

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Ivan Karaga

Zagreb, 2015.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Zoran Kožuh dipl. ing.

Student:

Ivan Karaga

Zagreb, 2015.

Izjava i zahvala

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se prof.dr.sc. Zoranu Kožuhu i doc.dr.sc. Ivici Garašiću na stručnim savjetima koje su mi pružali tijekom pisanja rada. Izrazito se zahvaljujem višoj asistentici dr.sc. Maji Jurici koja mi je svojom pristupačnošću i susretljivošću pomogla u pisanju diplomskoga rada i izradi eksperimenta.

Zahvaljujem se i djelatnicima Laboratorija za zavarivanje koji su mi pomogli u praktičnom dijelu izrade eksperimentalnog dijela rada.

Zahvaljujem se svome ocu Josipu i sestrama Andreji i Martini, koji su bili uz mene i pružali mi potporu tijekom cjelokupnog studiranja. Posebno se zahvaljujem strini Mari, stricu Ivanu, bratićima Anti i Damiru i baki Kati koji su također doprinijeli mom završetku studija. Zahvaljujem i djevojci Valentini što je bila uz mene i imala strpljenja tijekom moje zadnje godine studija.

Od srca Vam hvala!

Ivan Karaga



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu	
Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **IVAN KARAGA**

Mat. br.:

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **ANALIZA PRIMJENE TEHNIKE NJIHANJA PRI ROBOTIZIRANOM MAG ZAVARIVANJU**

Naslov rada na engleskom jeziku: **ANALYSIS OF ROBOTIZED MAG WEAVING PATTERN APPLICATION**

Opis zadatka:

Proučiti robotizirano MAG zavarivanje i analizirati najčešće korištene senzorske sustave te metode programiranja. Opisati utjecaje parametara zavarivanja na zavareni spoj te se posebno osvrnuti na utjecaj tehnike njihanja. Detaljno obraditi razne inačice tehnike njihanja uz navođenje njihove primjene. Navesti i pojasniti parametre njihanja te njihov utjecaj na konačni izgled i kvalitetu zavarenog spoja.

U eksperimentalnom dijelu potrebno je osmisliti plan pokusa i primjenom robotiziranog MAG zavarivanja na stanici OTC Almaga zavariti odgovarajuće uzorke raznim tehnikama njihanja. Ovisno o različitim položajima zavarivanja primijeniti odgovarajuću tehniku njihanja. Komentirati razlike o primjeni različitih tehnika njihanja i donijeti zaključke o optimalnom odabiru. Na temelju dobivenih saznanja dati preporuke za primjenu u proizvodnji.

Zadatak zadan:

24. rujna 2015.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Zoran Kožuh

Rok predaje rada:

26. studenog 2015.

Predviđeni datum obrane:

2., 3. i 4. prosinca 2015.

Predsjednik Povjerenstva:

Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA.....	VI
SAŽETAK.....	VII
ABSTRACT	VIII
1. UVOD	1
2. MIG/MAG ZAVARIVANJE.....	2
2.1. Parametri procesa	5
2.1.1. Brzina zavarivanja.....	6
2.1.2. Slobodni kraj žice.....	6
2.1.3. Zaštitni plinovi	7
2.1.4. Promjer elektrode	8
2.1.5. Tehnika njihanja pištolja	9
2.1.6. Položaji zavarivanja	11
2.2. Dodavači žice i pištolji za zavarivanje.....	17
2.2.1. Pištolji za zavarivanje	17
2.2.2. Dodavači žice	18
2.3. Postupak zavarivanja kao sustav	18
2.3.1. Praćenje procesa zavarivanja	19
2.3.1.1. MAG zavarivanje kratkim spojevima	19
2.3.1.2. MAG zavarivanje štrcajućim lukom	20
3. ROBOTI	21
3.1. Povijest robota.....	23
3.2. Strukture robota.....	24
3.2.1. Kriteriji radnog prostora.....	25
3.2.2. Matrica homogene transformacije.....	26
3.3. Metode programiranja robota.....	27
3.4. Roboti za zavarivanje	30
3.4.1. Robotska stanica.....	31

3.4.2. Definicija i detekcija parametara procesa	32
3.5. Senzori za geometrijske parametre	33
3.5.1. Optički senzori	34
3.5.2. Vizijski senzori.....	35
3.5.3. Senzori električnog luka.....	36
4. EKSPERIMENTALNI DIO.....	39
4.1. Robotska stanica.....	39
4.1.1. Robot Almaga AX-V6	41
4.1.2. Izvori struje	43
4.2. Izrada programa za njihanje	45
4.3. Analiza krivulje njihanja pri zavarivanju korijenskog prolaza	50
4.4. Analiza snimljenih krivulja njihanja	55
5. ZAKLJUČAK	60
LITERATURA	61

POPIS SLIKA

Slika 2.1. Shematski prikaz MIG/MAG zavarivanja [1].....	2
Slika 2.2. Prijenos materijala kratkim spojem, pojednostavljeni prikaz (a) i dijagramski prikaz ovisnosti struje i napona tijekom kratkog spoja (b) [2].....	3
Slika 2.3. Pojednostavljeni prikaz prijenosa materijala, prijelazni (a) i štrcajući (b) luk [2].....	4
Slika 2.4. Ravna izlazna naponska karakteristika stroja [2].....	5
Slika 2.5. Strmopadajuća izlazna naponska karakteristika stroja [2].....	6
Slika 2.6. Geometrija električnog luka i profil zavarenog spoja kod različitih zaštitnih plinova Ar i He [5].....	8
Slika 2.7. Ovisnost geometrije zavarenog spoja o vrsti zaštitnog plina [6]	8
Slika 2.8. Osnovni obrasci njihanja [7]	10
Slika 2.9. Pregled unosa topline kod zavarivanja sa tehnikom njihanja [8].....	10
Slika 2.10. Položaji zavarivanja [9]	11
Slika 2.11. Zavarivanje u položenom horizontalnom položaju [8]	12
Slika 2.12. Zavarivanje u vertikalno horizontalnom položaju [8].....	13
Slika 2.13. Vertikalno zavarivanje prema gore i dolje [8]	14
Slika 2.14. Vertikalno zavarivanje preklopnog i T spoja [10]	15
Slika 2.15. Vertikalno zavarivanje, sučeljeni spoj [10].....	16
Slika 2.16. Tehnika njihanja kod nadglavnog zavarivanja [8]	16
Slika 2.17. Poprečni presjek tipičnog pištolja za MIG/MAG zavarivanje: A – ergonomski oblikovana drška; B – kontaktna vodilica; C – sapnica plina; D – plinski difuzor; E – konektor za napajanje; F – središnje crijevo koje sadrži crijevo za plin/polikabel; G – prekidač; H – zamjenjiva košuljica; I – prilagodljiva mlaznica [2]	17
Slika 2.18. Proces zavarivanja kao sustav [11]	19
Slika 3.1. Prikaz zone korištenja industrijskih robota [12]	21
Slika 3.2. Svjetska godišnja opskrba industrijskih robota (2005 – 2014) [13]	22
Slika 3.3. KUKA robotska ruka sa 7 stupnjeva slobode gibanja i omjera težine i opterećenja 1:1(lijevo), robot za praćenje kontinuirane putanje IRB-6 (desno) [14].....	24

Slika 3.4. Matrica homogene transformacije u koordinatnom sustavu [17]	26
Slika 3.5. Privjesak za učenje [19]	27
Slika 3.6. Programiranje kretanjem po stazi i upravljač na robotskoj ruci [18].....	28
Slika 3.7. Prikaz parametara koje je moguće regulirati kod programiranja točka po točka [20] ..	29
Slika 3.8. Uobičajena zavarivačka robotska stanica [22]	31
Slika 3.9. Pregled zavarivačkog kontrolnog sustava [4]	32
Slika 3.10. Parametri sučeljenog spoja i kutnog spoja [4]	33
Slika 3.11. Princip triangulacije [23]	34
Slika 3.12. Princip laserskog skeniranja [21]	35
Slika 3.13. Konstrukcija vizijskog senzora [24]	36
Slika 3.14. Senzor električnog luka [21]	37
Slika 3.15. Načini detektiranja promjene signala kod senzora električnog luka [21]	38
Slika 4.1. Robotska stanica [25]	40
Slika 4.2. Radni prostor robota [26]	41
Slika 4.3. Osnovni dijelovi robotske stsnice [26]	42
Slika 4.4. Izvori za zavarivanje [26]	44
Slika 4.5. Prozori u kojima se definiraju parametri zavarivanja	46
Slika 4.6. Prozor u kojem se definiraju parametri njihanja	47
Slika 4.7. Funkcije njihanja koje posjeduje AX – V6 robot	47
Slika 4.8. Oblika njihanja pištolja ovisno o postotku i smjeru kretanja a) kretanje s lijeve strane, postotak 10/75 b) kretanje s desne strane, postotak 10/75 c) kretanje s desne strane, postotak 100/100.....	48
Slika 4.9. Prikaz promjene radijusa kružnice u odnosu na postotak	48
Slika 4. 10. Definiranje amplitude pri linearnoj i trigonometrijskoj te kružnoj funkciji	48
Slika 4.11. Točke zaustavljanja pištolja	49
Slika 4.12. Gibanje u zaustavnoj točki	49
Slika 4.13. Kut njihanja.....	50

Slika 4.14. Nagib pištolja	50
Slika 4.15. Izgled pisala montiranog na vrh pištolja za zavarivanje	51
Slika 4.16. Izgled osnovnog prozora privjeska za učenje	51
Slika 4.17. Dijagramski prikaz ovisnosti širine perioda krivulje i vremena zadržavanja	56
Slika 4.18. Dijagramski prikaz ovisnosti širine perioda i vremena zadržavanja.....	58

POPIS TABLICA

Tablica 4.1. Tehničke karakteristike Robota AX-V6 [26]	43
Tablica 4.2. Tehnički podaci VPS 4000 digit izvora za zavarivanje [26].....	44
Tablica 4.3. Tehnički podaci Vartig 3500 digit AC/DC izvora za zavarivanje [26].....	45
Tablica 4.4. Parametri zavarivanja	52
Tablica 4.5. Parametri njihanja i izgled korijenskog prolaza i krivulje njihanja linearne tehnike	52
Tablica 4.6. Parametri njihanja i izgled korijenskog prolaza i krivulje njihanja kružne tehnike..	54
Tablica 4.7. Parametri zavarivanja za navare zavarene kružnom tehnikom njihanja	55
Tablica 4.8. Izgled navara i krivulje kružne tehnike njihanja	56
Tablica 4.9. Parametri za navarivanje navareni linearnom tehnikom njihanja	57
Tablica 4.10.....	58

SAŽETAK

U uvodnom dijelu rada obrađen je MIG/MAG postupak zavarivanja i roboti za robotizirano zavarivanje. Opisani su parametri zavarivanja kod MIG/MAG postupka, programiranje robota i upotreba senzora kod zavarivanja. Detaljnije je opisan parametar njihanja pištolja. Eksperimentalni dio se sastoji od dva dijela u kojima su opisani utjecaji različitih oblika njihanja pištolja na izgleda zavarenog spoja. U zaključnom dijelu rada dani su komentari i zaključci vezani uz dobivene rezultate eksperimentalnog dijela.

Ključne riječi: MIG/MAG zavarivanje, robotizirano zavarivanje, njihanje, senzori za robotizirano zavarivanje

ABSTRACT

In the introduction of this paper MIG/MAG welding process and robotics welding were processed. Welding parameters of the MIG/MAG, robot programming and use of sensors for welding have been described. A more detailed descriptions of torch weaving parameters is given. Experimental part is composed of two parts in which have been described the various influence of the torch weaving on the welded joint. In conclusion the comments and conclusions related to the experiment results was given.

In prelude MIG/MAG welding and robots for robotized welding were described. Also MIG/MAG welding parameters, robot programming and sensor usage in welding were described. The parameter in torch weaving was described in detail. The experimental part consists of two parts in which different features in torch weaving influence the appearance of welding joint were described. In conclusion comments and conclusions for obtained experimental results were given.

Key words: MIG/MAG welding, robotized welding, weaving, sensors for robotic welding

1. UVOD

Zavarivanje kao tehnika rada često se predstavlja kao vrlo zahtjevna disciplina. Iskusni i kvalitetni zavarivači vrlo su cijenjeni uglavnom jer kontrolirati proces zavarivanja nije nimalo lako naučiti. U ranijim godinama zavarivači su bili uglavnom najviše zaslužni za stvaranje kvalitetnih zavarenih spojeva. Naposljetku razvoj tehnika zavarivanja doveo je do toga da radnik nije u stanju vršiti zavarivanje, a da pri tom postupku dobije dovoljno kvalitetan zavareni spoj pri dovoljno kratkom vremenu i pri dovoljno niskoj cijeni. Taj razvoj postupaka zavarivanja prate dodatna pomagala kao što su automati i roboti koji svojom preciznošću, ponovljivošću i brzinom nadmašuju sposobnosti čovjeka. Mana tih alata je problem koji se javlja kod njihovog programiranja za kompleksnije zavarene spojeve. Automati su nezamjenjivi za zavarivanje ravnih spojeva, dok se od robota očekuje da odrade posao vrlo sličan ljudskom.

Industrijski roboti neizostavne su komponente današnje proizvodnje. Zahtjevi visoke kvalitete, niske cijene, fleksibilnosti jednostavno prisiljavaju na razvoj inteligentnih strojeva. Robotika je vrlo kompleksna grana inženjerstva, a sinergijom robotike i zavarivanja dobiva se jedna vrlo kompleksna struktura koju je vrlo teško u potpunosti optimizirati.

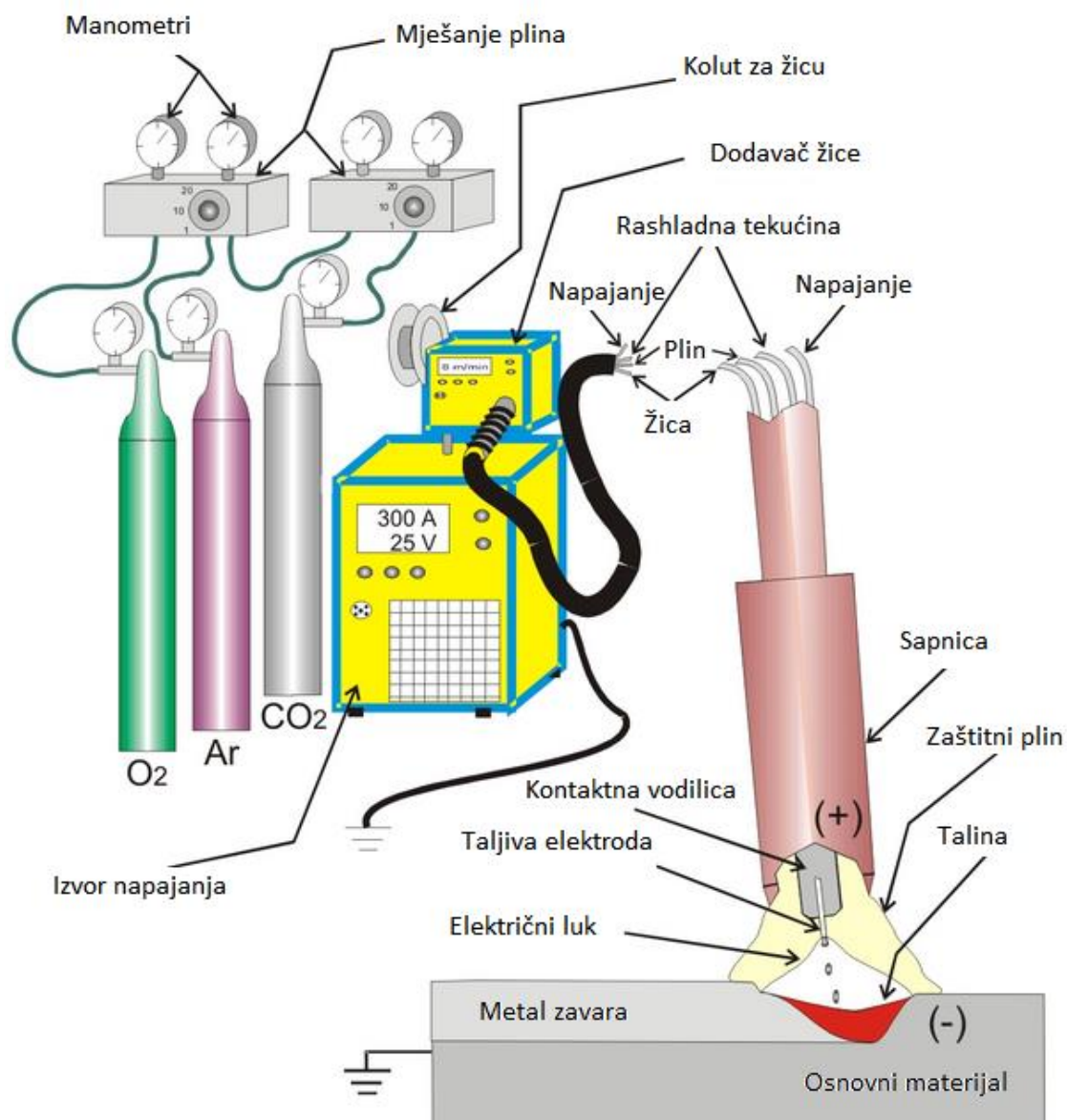
MIG/MAG postupak zavarivanja relativno je lagano robotizirati, jer svojom izvedbom spada u poluautomatsko zavarivanje. Automatsko dodavanje žice kod MIG/MAG postupka osigurava konstantan priljev dodatnog materijala koji nije lako dobiti ako se dodavanje materijala izvodi ručno (TIG, REL). Stavljanjem pištolja za MIG/MAG zavarivanje na robotsku ruku osigurava se dodatni konstantan parametar, a to je brzina zavarivanja. Problemi se javljaju kod drugih parametara koje čovjek lakše kontrolira (ponašanje taline, njihanje pištolja, smanjivanje povećavanje struje...).

Problemi koje je potrebno rješavati da se dobije kvalitetno robotizirano MIG/MAG zavarivanje opisano je u uvodnom dijelu rada.

U eksperimentalnom dijelu rada opisani su utjecaji oblika njihanja pištolja na izgled zavarenog spoja.

2. MIG/MAG ZAVARIVANJE

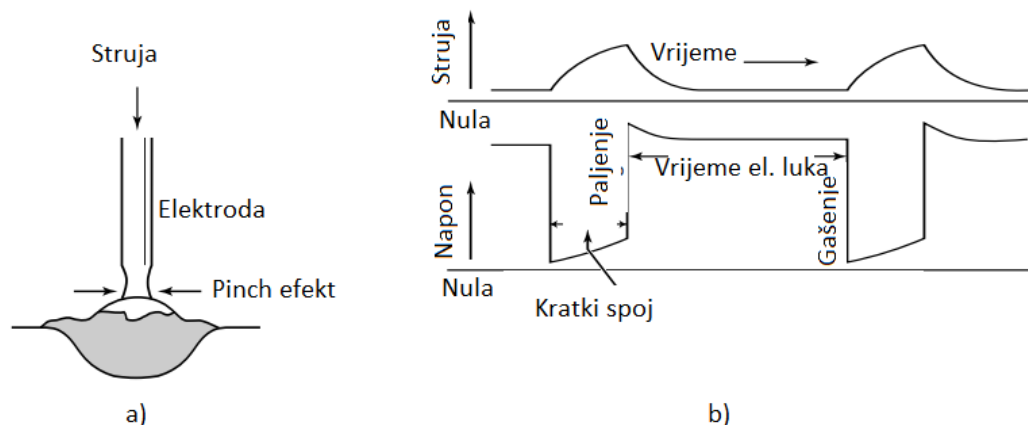
Elektrolučno zavarivanje taljivom žicom u zaštitnoj atmosferi inertnog/aktivnog plina (*Metal Inert/Aktive Gas*) postupak je zavarivanja kod kojeg se električni luk stvara između taljive elektrode u obliku žice i radnog materijala, a proces je zaštićen u plinskoj atmosferi inertnog ili aktivnog plina. Shematski prikaz procesa vidljiv je na slici 2.1.



Slika 2.1. Shematski prikaz MIG/MAG zavarivanja [1]

Veći dio toplote koja se generira u električnom luku nastaje na pozitivnom polu, u ovom slučaju na elektrodi, što dovodi do brzog taljenja elektrode i efektivnog prijenosa te toplote u zavareni spoj. Kada se zavaruje s nižim strujama vrh žice se ne stigne rastaliti dovoljno brzo pa vrh dolazi u kontakt sa zavarom stvarajući kratki spoj (slika 2.2.a). Taj kratki spoj uzrokuje taljenje žice jer pri kratkom spoju teče jaka struja i rastaljena žica se spaja s osnovnim materijalom koji je također

rastaljen zbog velike topline. Električni luk se ponovno uspostavlja i taj ciklus se ponavlja (slika 2.2b). Ovakav prijenos materijala naziva se kratki spoj.



Slika 2.2. Prijenos materijala kratkim spojem, pojednostavljeni prikaz (a) i dijagramski prikaz ovisnosti struje i napona tijekom kratkog spoja (b) [2]

Prednosti prijenosa materijala kratkim spojevima:

- moguće zavarivanje u svim položajima,
- mali unos topline smanjuje deformacije radnog komada,
- visoka iskoristivost elektrode do 93%.

Ograničenja prijenosa materijala kratkim spojevima:

- zavarivanje tanjih ploča (neefikasno zavarivanje debljih ploča), a kod debljih ploča samo korijenski prolaz,
- loša kontrola procesa zavarivanja, mogućnost nepotpunog protaljivanja (naljepljivanje),
- loša kontrola procesa može rezultirati sa povećanim prskanjem i većom cijenom naknadnog čišćenja,
- prihvatljiv postupak zavarivanja kod zavarivača.

Kod viših struja zavarivanja dodatni materijal se prenosi kombinacijom kratkih spojeva i prijenosom kapljica uz pomoć gravitacije. Ovakav način prijenosa materijala naziva se prijelazni luk jer se nalazi između prijenosa kratkim spojevima i štrcajućeg luka (slika 2.3. a).

Prednosti prijenosa materijala mješovitim lukom:

- Koristi se kod zavarivanja velikim brzinama.

Nedostaci prijenosa materijala mješovitim lukom:

- Velika količina prskanja kod zavarivanja uzrokuje visoke troškove naknadnog čišćenja.
- Ovaj postupak zavarivanja manje je prihvatljiv za zavarivače.
- Mogućnost nastanka naljepljivanja i zbog nepredvidivog prskanja odvojenih kapljica dolazi do problema naljepljivanja istih na sapnicu pištolja.

- Zavareni spoj je konveksnog oblika, a krajevi spoja nisu lijepo razliveni, nedovoljna razlivenost taline.
- Zbog velikog praskanja smanjuje se efikasnost elektrode odnosno dodatnog materijala (87 – 93%).

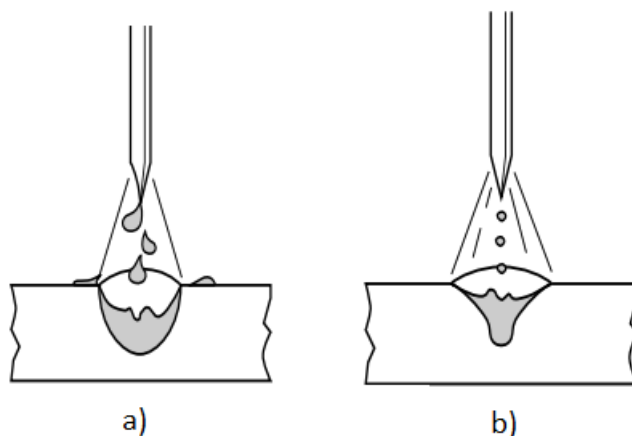
Štrcajući luk je prijenos materijala pri još većim energijama. Dodatni materijal se pri visokim temperaturama uzrokovanih visokim strujama tale u male rastaljene kapljice koje dodatno aksijalno ubrzavaju prema radnom komadu zbog djelovanja plazme električnog luka (slika 2.3. b). [2, 3].

Prednosti prijenosa materijala kod štrcajućeg luka:

- Veća količina depozita.
- Iskoristivost dodatnog materijala elektrode od 98% i više.
- Moguće korištenje sa velikim brojem dodatnih materijala i promjerima elektroda.
- Izvrsni oblik zavarenog spoja.
- Prihvatljivo kod zavarivača.
- Potrebno vrlo malo naknadnog čišćenja zavarenog spoja.
- Izvrsno protaljivanje.
- Koristi se kod poluautomatske, robotizirane i tvrdo automatizirane proizvodnje.

Nedostaci štrcajućeg luka:

- Ograničen na horizontalni položaj zavarivanja.
- Stvaranje veće količine zavarivačkih dimova.
- Visoka radijacija topline i svijetla zahtijeva bolju zaštitu zavarivača.
- Plinovi koji se koriste kod ovakvog prijenosa materijala skuplji su od čistog CO₂.

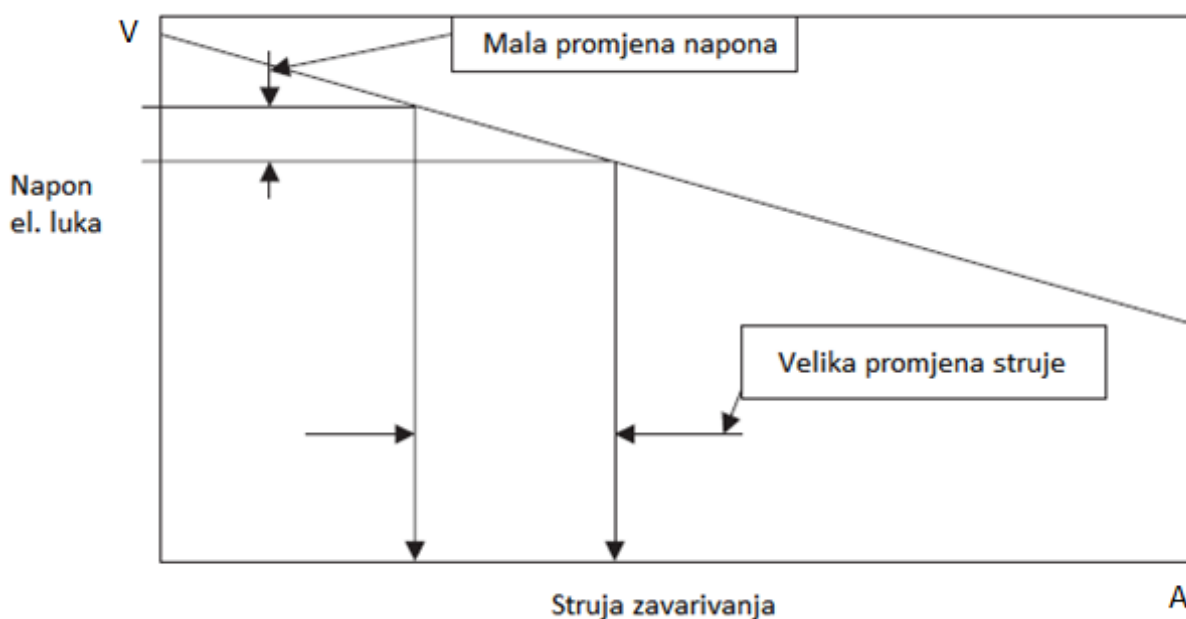


Slika 2.3. Pojednostavljeni prikaz prijenosa materijala, prijelazni (a) i štrcajući (b) luk [2]

2.1. Parametri procesa

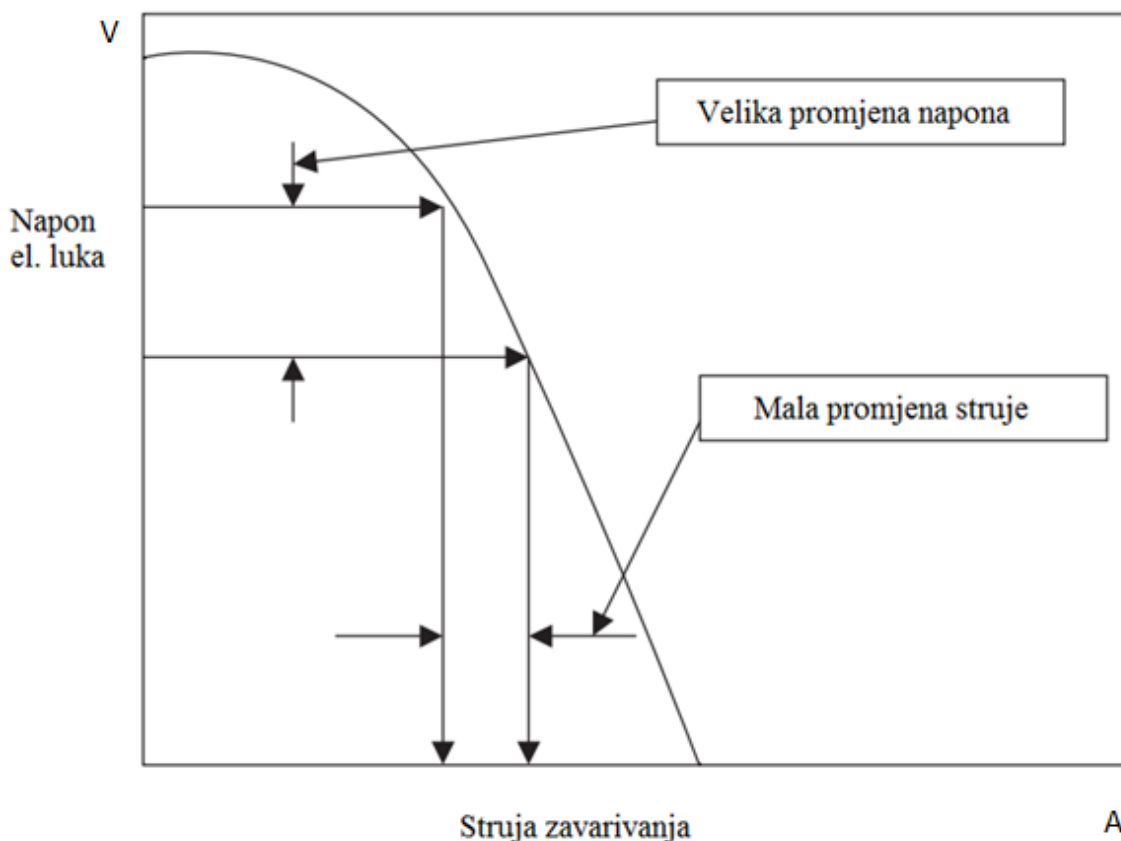
Parametri zavarivanja utječu na način prijenosa materijala, stabilnost električnog luka, pojavu prskanja, geometriju zavora i sveukupnu kvalitetu spoja. Glavni parametri procesa su struja, napon, brzina zavarivanja, slobodni kraj žice i promjer elektrode. Postoje i drugi parametri kao što je orijentacija elektrode i vrsta elektrode koji također utječu na mehanizam prijenosa materijala. Navedeni parametri nisu međusobno neovisni. Struja i napon ovise o izlaznim karakteristikama izvora, napon ovisi ne samo o duljini luka već i o slobodnom kraju žice i o vrsti zaštitnog plina.

MIG/MAG postupak zavarivanja zahtijeva izvor struje koji osigurava prikladni odnos struje zavarivanja i napona. Odnos koji govori o tom odnosu naziva se statičko – dinamička karakteristika izvora. Kako je spomenuto MIG/MAG postupak zavarivanja koristi kontinuiranu žicu kao dodatni materijal i vrlo je važno da se brzina taljenja žice izjednači s brzinom dodavanja žice. Kako bi se dobila takva karakteristika mnogi MIG/MAG uređaji konstruirani su tako da imaju ravnu naponsku izlaznu karakteristiku (karakteristika konstantnog napona). Zavarivaču je vrlo teško držati pištolj tako da ne mijenja visinu električnog luka. Kada se mijenja visina električnog luka (slika 2.4.), ravna naponska izlazna karakteristika osigurava da se pri maloj promjeni visine napona luka struja jako mijenja. Ako na primjer dođe do smanjenja visine električnog luka, opada i iznos njegovog napona, počinje rasti struja zavarivanja koja brže tali dodatni materijal u obliku žice i time povećava razliku visine između osnovnog materijala i dodatnog materijala. Taj način kontrole visine luka naziva se unutarnja regulacija električnog luka.



Slika 2.4. Ravna izlazna naponska karakteristika stroja [2]

Suprotno ravnoj karakteristici postoji i strmopadajuća karakteristika stroja ili karakteristika konstantne struje (slika 2.5.). Ovakva izlazna karakteristika napona ponajviše se koristi kod TIG i REL postupka zavarivanja, ali ima i svoje prednosti kod MIG zavarivanja aluminija. Kod strmopadajuće karakteristike velika razlika u naponu električnog luka rezultira neznačajnom promjenom struje zavarivanja. Zbog toga razloga unos topline je relativno konstantan, za razliku kod ravne karakteristike kod koje dolazi do veće penetracije zbog malog pada napona električnog luka [2].



Slika 2.5. Strmopadajuća izlazna naponska karakteristika stroja [2]

2.1.1. Brzina zavarivanja

Povećanjem brzine zavarivanja smanjuje se unos topline na radni komad i depozit rastaljenog dodatnog materijala po duljini zavora. Inicijalno povećanje brzine zavarivanja može uzrokovati povećanje penetracije zbog izravnijeg djelovanja električnog luka na radni komad, ali se daljnjim povećanjem brzine zavarivanja smanjuje penetracija i omogućuje nastanak zajeda zbog nedovoljne količine dodatnog materijala da popuni šupljine nastale zbog električnog luka [4].

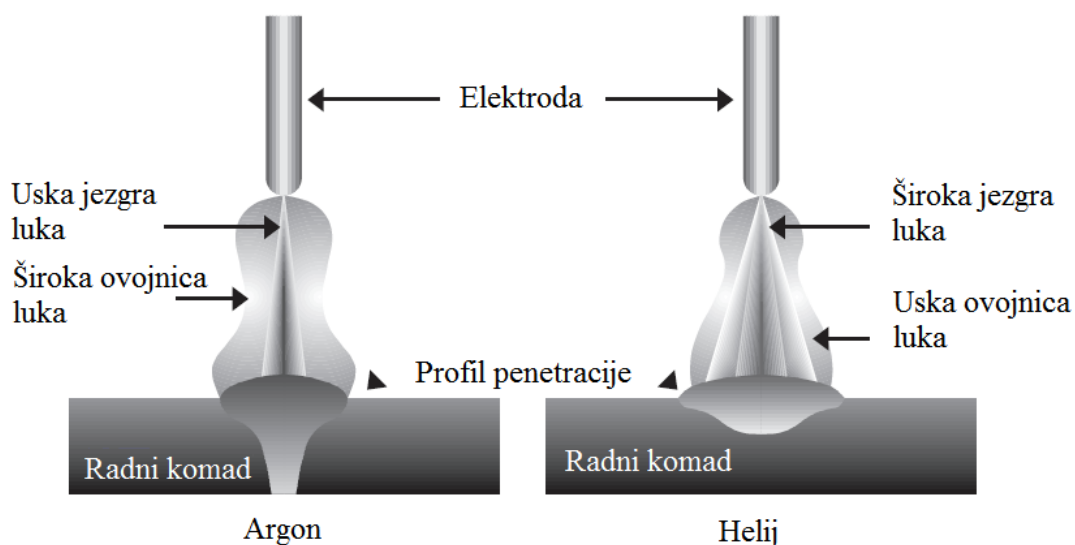
2.1.2. Slobodni kraj žice

Slobodni kraj žice je duljina elektrode od kontaktne vodilice do radnog komada. Povećanje duljine slobodnog kraja žice zbog većeg razmaka pištolja od radnog komada za specifične parametre

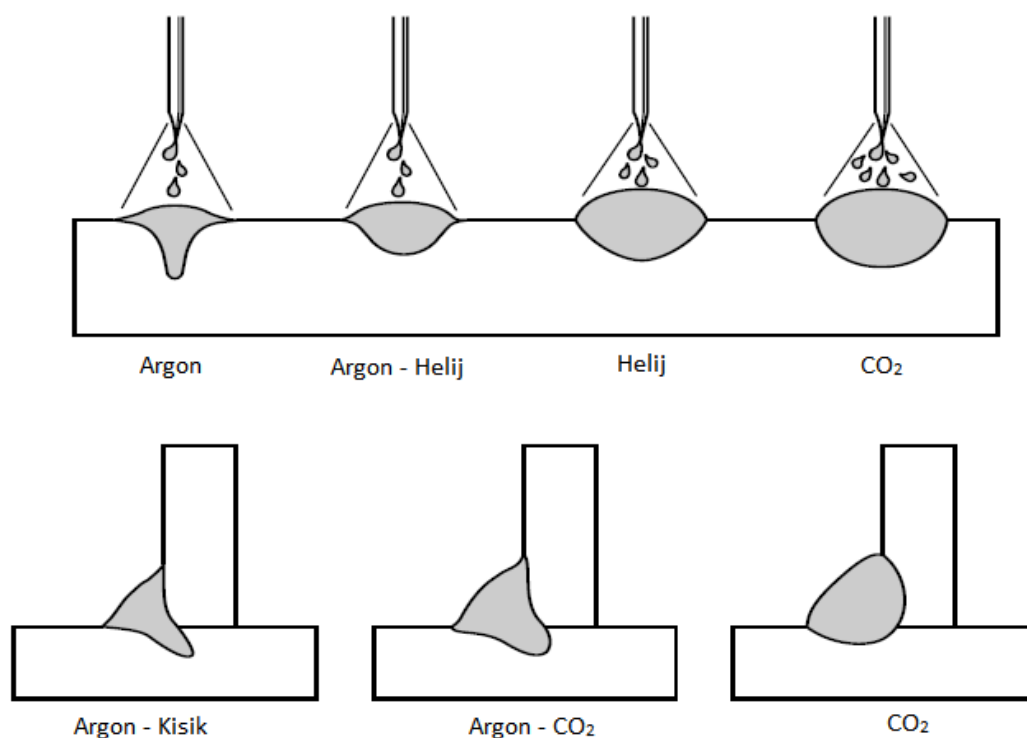
povećava depozit rastaljenog dodatnog materijala zbog Joulove topline [4]. Slobodni kraj žice kreće se od 5 do 15 mm za zavarivanje kratkim spojevima odnosno do 25 mm za druge vrste prijenosa materijala (mješoviti, štrcajući luk).

2.1.3. Zaštitni plinovi

Zaštitni plin je vrlo važan kod gotovo svih postupaka zavarivanja električnim lukom. Glavna uloga zaštitnog plina je zaštita električnog luka i samoga mjesta zavarivanja od okolne atmosfere. Takva zaštita sprečava kisik iz okolne atmosfere da reagira (oksidira) sa zavarenim spojem i zagrijanim osnovnim materijalom. Također sprečava da i drugi elementi iz okolne atmosfere (vodik i dušik) kontaminiraju mjesto zavarivanja, jer mogu prouzročiti krhkost, poroznost i pucanje zavarenog spoja. Vodik može uzrokovati krhkost u zoni utjecaja topline. Druge funkcije zaštitnog plina su utjecaj na oblik i karakteristiku električnog luka, geometriju zavara, oblik nadvišenja zavara, brzinu zavarivanja, izgaranje legiranih elemenata, korozijsku postojanost i mehanička svojstva zavarenog spoja. Svaka komponenta zaštitnog plina drugačije utječe na svojstva zavarenog spoja. Najčešće korišteni zaštitni plinovi kod MIG/MAG zavarivanja mogu biti čisti plinovi, dvostruke, trostruke i iznimno četverostruke mješavine. Najčešći čisti plinovi su argon, helij i ugljikov dioksid. Prva dva plina su inertna i koriste se za zavarivanje obojenih metala. Helij ima veći potencijal ionizacije od argona i uzrokuje manju penetraciju i veću širinu zavarenog spoja (slika 2.6.). Binarne mješavine su najčešće argon/ugljikov dioksid (do 20% CO₂), argon/kisik (do 5% O₂) i argon/helij (do 75% He). Dodavanjem kisika i ugljikovog dioksida u mješavinu povećava se stabilnost električnog luka i razlivenost taline (slika 2.7.). Mješavine s dodatkom helija povećavaju unos topline, a time i brzinu zavarivanja, te se ujedno smanjuje vjerojatnost nastanka poroznosti u zavarenom spoju [4 – 6].



Slika 2.6. Geometrija električnog luka i profil zavarenog spoja kod različitih zaštitnih plinova Ar i He [5]



Slika 2.7. Ovisnost geometrije zavarenog spoja o vrsti zaštitnog plina [6]

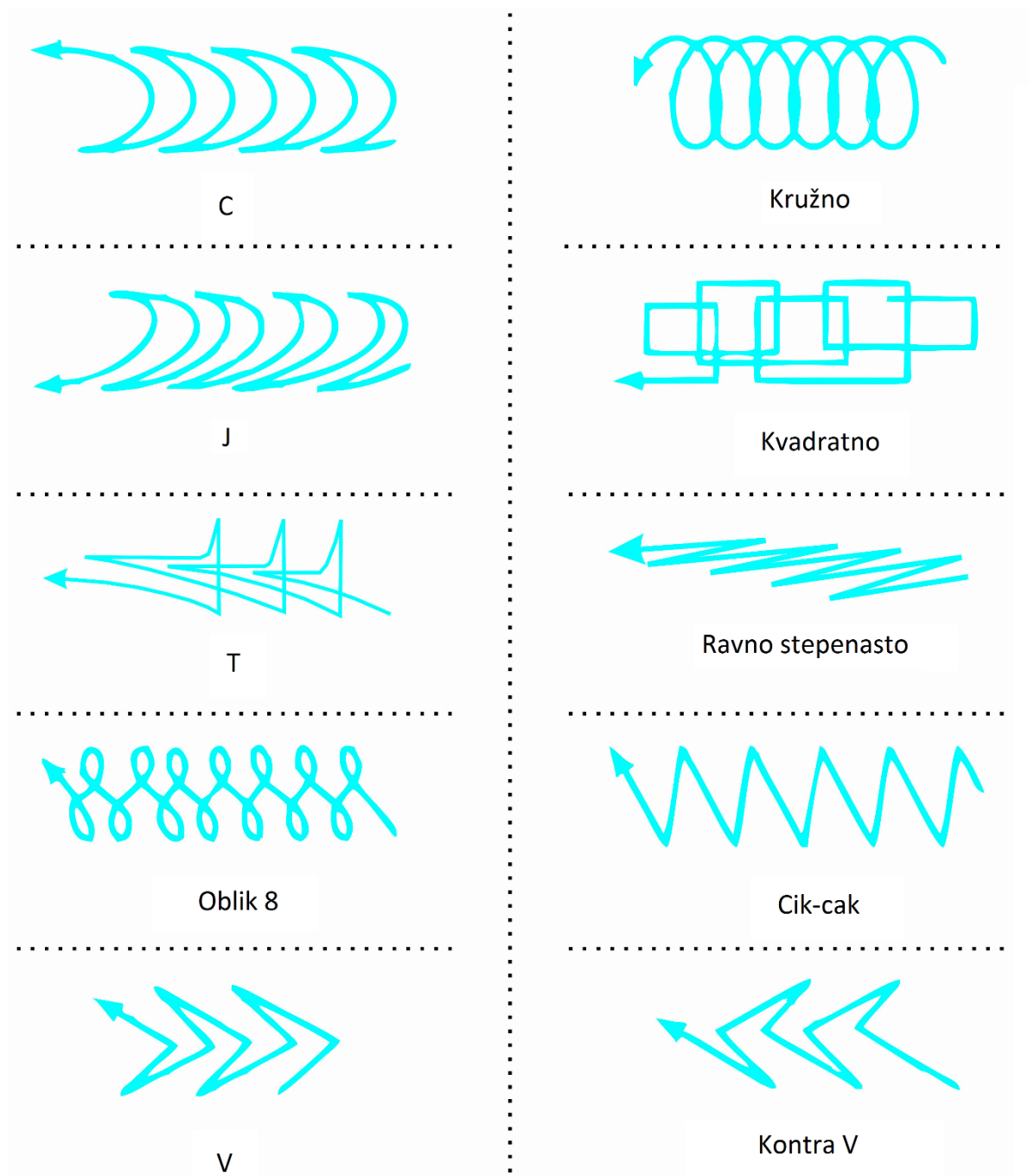
2.1.4. Promjer elektrode

Kemijski sastav žice sličan je materijalu koji se zavaruje. Najčešći promjeri elektroda koji se koriste su 0,8 mm, 1 mm, 1,2 mm, 1,6 mm i 3,2 mm. Elektrode manjih promjera koriste se za zavarivanje tanjih materijala. Žice promjera 1,2 mm, 1,6 mm i 3,2 mm koriste se za deblje materijale i zbog toga koriste više struje koje onda stvaraju veći depozit materijala. Kako se žica

ponaša kao elektroda i dodatni materijal, potrebno je voditi računa da se skladište u čistim i suhim prostorima kako ne bi došlo do pojave grešaka u zavarenim spojevima [2, 4].

2.1.5. Tehnika njihanja pištolja

Njihanje pištolja spada u jedan od parametara koji se koristi prilikom zavarivanja. Parametar njihanja je ustvari ništa drugo nego fizičko pomicanje pištolja u nekom od obrasca gibanja (slika 2.8.). Tehnika njihanja pretežno se koristi kako bi se prekrio veći dio područja koji se zavaruje. Koristi se kod korijenskog zavarivanja, višeslojnog zavarivanja i prekrivanja nadvišenja prijašnjih zavara [7].



Slika 2.8. Osnovni obrasci njihanja [7]

U osnovi postoje četiri načina gibanja pištolja koji na kraju različitim pokretima formiraju krajnje obrasce njihanja. To su:

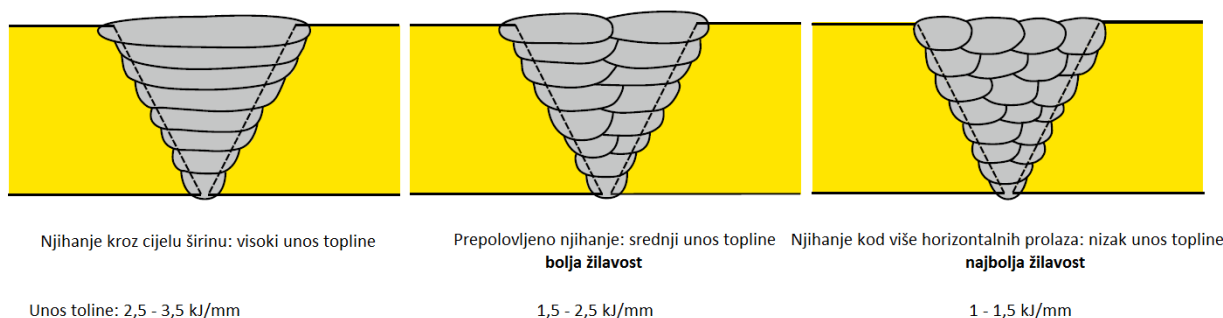
- povlačenje,
- gibanje naprijed-nazad,
- kružno gibanje,
- njihanje.

Povlačenje pištolja je osnovna tehnika i zahtijeva da zavarivač giba pištolj jednako od početka do kraja zavarivanja. Najčešće se koristi kod robotiziranog zavarivanja, jer robot bez poteškoća može osigurati konstantno gibanje pištolja.

Gibanje naprijed-nazad koristi se kod zavara čiji oblik odgovara konstantnom gibanju pištolja i kod kutnog zavarivanja. Ovaj način gibanja kao što sami naziv govori izvodi se pomicanjem pištolja naprijed pa za korak natrag pa nastavak gibanja naprijed. Prilikom takvog pomicanja pištolja osigurava se talina u uskom raspona ali i pregrijava se spoj prije popune sa dodatnim materijalom.

Kružno gibanje se po svom načinu gibanja može svrstati između gibanja naprijed-nazad i njihanja. Koristi se na većini spojeva i može se primijeniti skoro svugdje. Izvodi se tako da se pištoljem rade mali kružni pokreti, pomiče se naprijed, pa ponavljaju kružni pokreti.

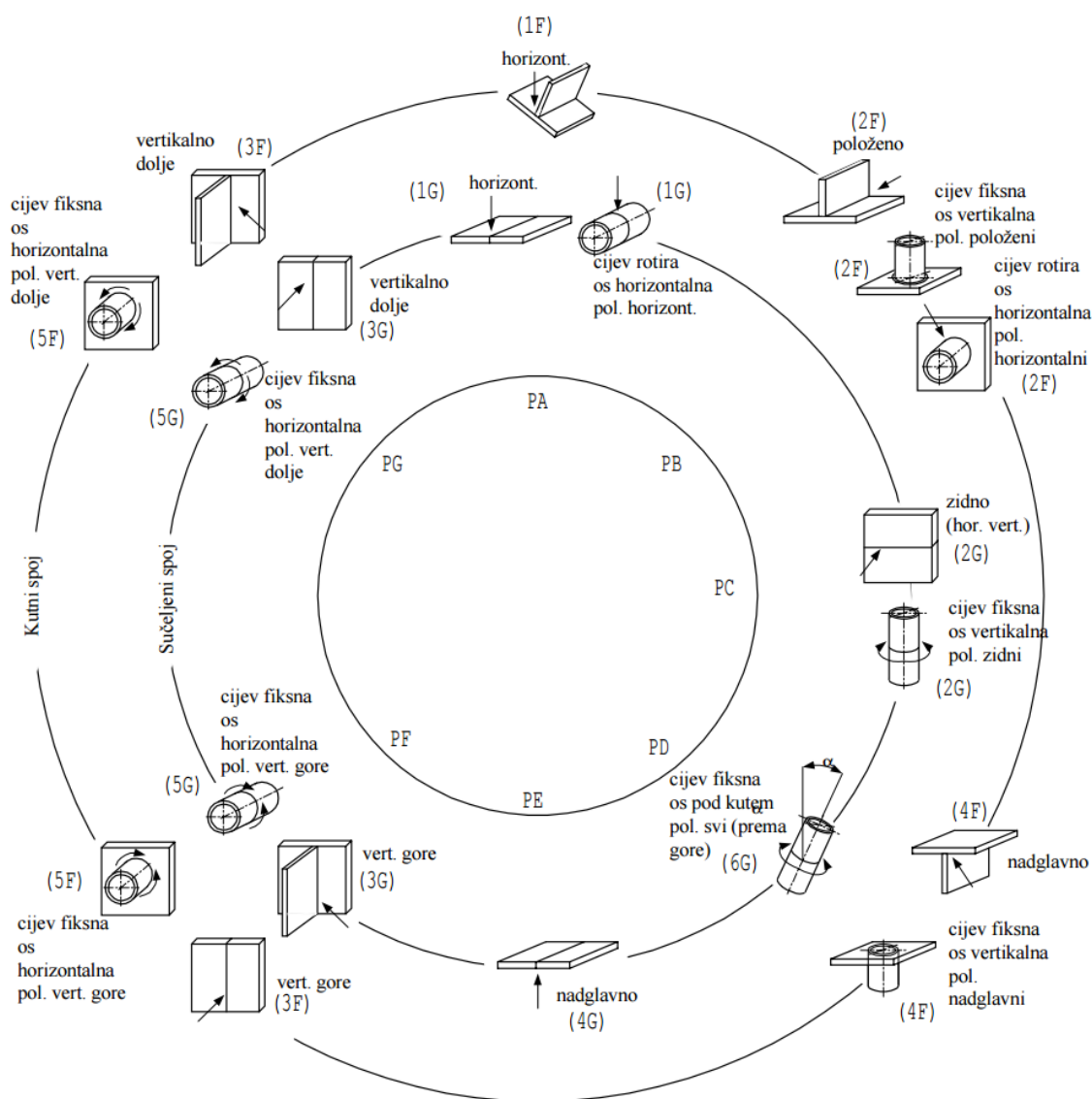
Njihanje se koristi kod širih spojeva i gdje nije moguće pokriti cijeli spoj u jednom prolazu. Njihanje je dobro za velike spojeve kod kojih nema opasnosti od pojave distorzije, jer se kod jako širokih amplituda njihanja povećava unos topline. Rješavanje tog problema je zavarivanje u više prolaza u horizontalnoj ravnini kao što prikazuje slika 2.9.



Slika 2.9. Pregled unosa topline kod zavarivanja sa tehnikom njihanja [8]

2.1.6. Položaji zavarivanja

Parametri koji osiguravaju optimalni zavareni spoj mijenjaju se promjenom položaja zavarivanja. Prilikom zavarivanja postoje četiri osnovna položaja: položeni horizontalni, vertikalni, horizontalno-vertikalni i nadglavni. Iz ta četiri položaja norma DIN EN ISO 6947 definira niz drugih položaja prikazanih na slici 2.10. Gravitacija je jedina komponenta koja razlikuje ova četiri osnovna položaja. Važno je moći pratiti talinu prilikom zavarivanja, a gravitacija je jedna od važnijih komponenta koja definira izgleda zavarenog spoja. Različitim promjenama njihovanja moguće je kontrolirati talinu koja se zbog djelovanja gravitacije u različitim položajima ponaša različito.

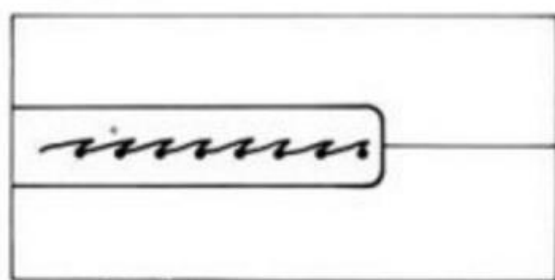


Slika 2.10. Položaji zavarivanja [9]

Položeni, horizontalni položaj

Preporučeni obrazac njihanja za položeni položaj zavarivanja prikazan je na slici 2.11. Za zavarivanje sučeljenog spoja u jednom prolazu koristi se lagani stepenasti obrazac u natrag, gdje se pištolj giba naprijed i prilikom prelaza na drugu stranu spoja lagano vraća unatrag. Kod korijenskog prolaza koristi se C njihanje. Popuna i završni prolaz koriste istu tehniku njihanja cik – cak, samo što se za određenu širinu korigira amplituda. Dobra popuna i protaljenost na krajevima zavarenog spoja vrši se laganim zadržavanjem na krajnjim položajima. Kut pištolja u smjeru gibanja je $5 - 10^\circ$, a u odnosu na radni komad je 90° .

Sučeljeni spoj jedan prolaz



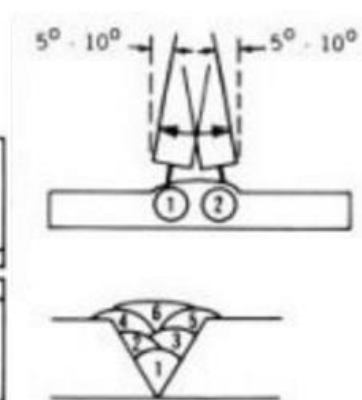
Smjer gibanja →

Njihanje pištolja

Sučeljeni spoj više prolaza



Smjer gibanja →



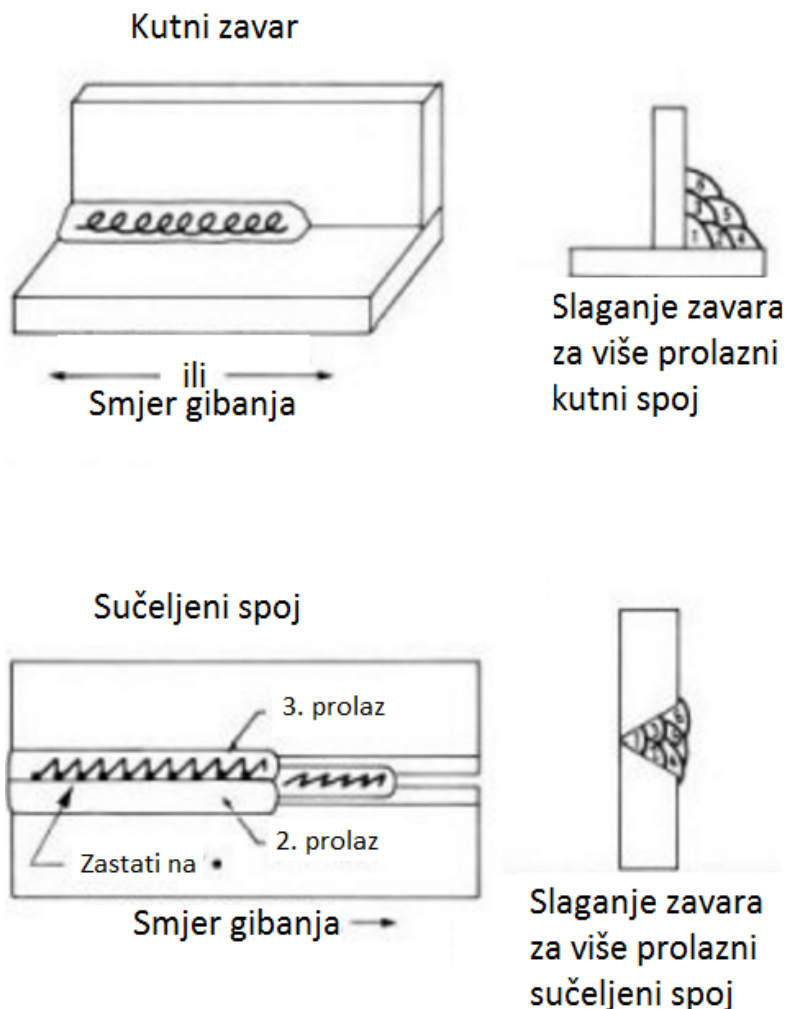
Slaganje zavora kod više prolaznog sučeljenog spoja

Slika 2.11. Zavarivanje u položenom horizontalnom položaju [8]

Horizontalno vertikalni položaj

Obrazac njihanja za horizontalni položaj zavarivanja prikazan je na slici 2.12. Kutno zavarivanje vrši se kružnim kretnjama pištolja. Kod sučeljenog horizontalnog zavarivanja korijenskog prolaza i popune koristi se stepenasta metoda njihanja. Na taj način kontrolira se talina kako ne bi iscurila prema dolje. Amplituda njihanja korigira se ovisno o širini zavarenog spoja. Kao i kod položenog položaja potrebno je zadržavanje pištolja na krajevima spoja radi bolje protaljenosti. Kut pištolja kod kutnog zavarivanja u odnosu na donji radni komad iznosi 45° , a u odnosu na smjer gibanja od

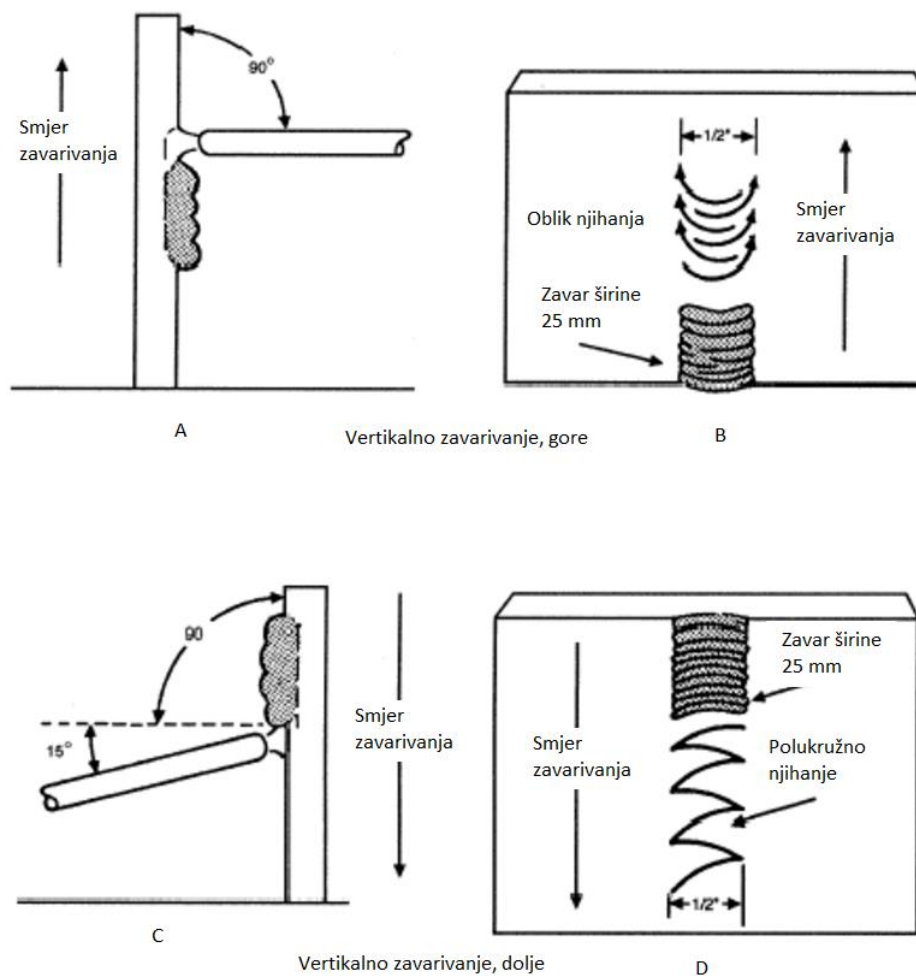
5 – 10°. Kod sučelnog spoja kut pištolja u odnosu na radni komad iznosi 90°, u odnosu na smjer gibanja 5 – 10° [8].



Slika 2.12. Zavarivanje u vertikalno horizontalnom položaju [8]

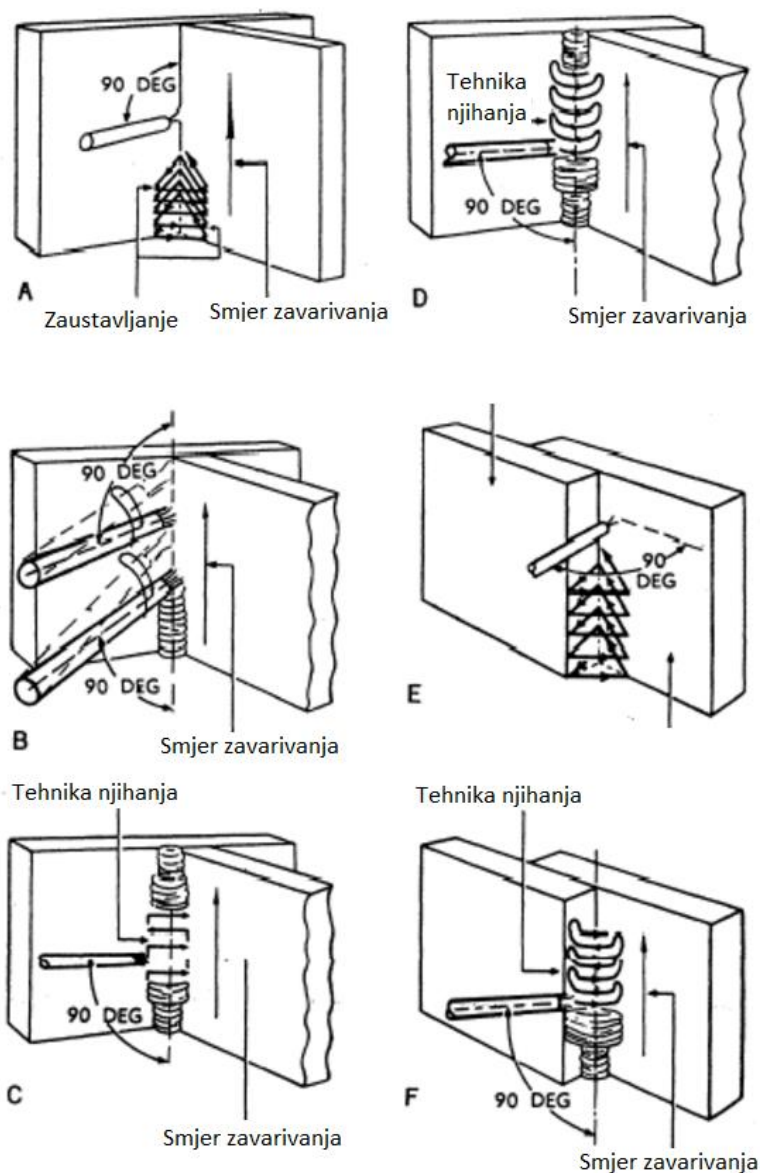
Vertikalni položaj

Za dobivanje zadovoljavajućeg zavarenog spoja kod vertikalnog položaja zavarivanja potrebno je održavati pravi kut između pištolja i radnog komada. Vertikalno zavarivanje prema gore zahtijeva kut pištolja od 90° u odnosu na radni komad (slika 2.13. a) i njihanje u obliku slova C (slika 2.13. b). Zavarivanje prema dolje zahtijeva kut elektrode malo veći od 90° (slika 2.13. c) kako ne bi došlo do curenja taline, i njihanje u obliku polukružnice (slika 2.13. d).



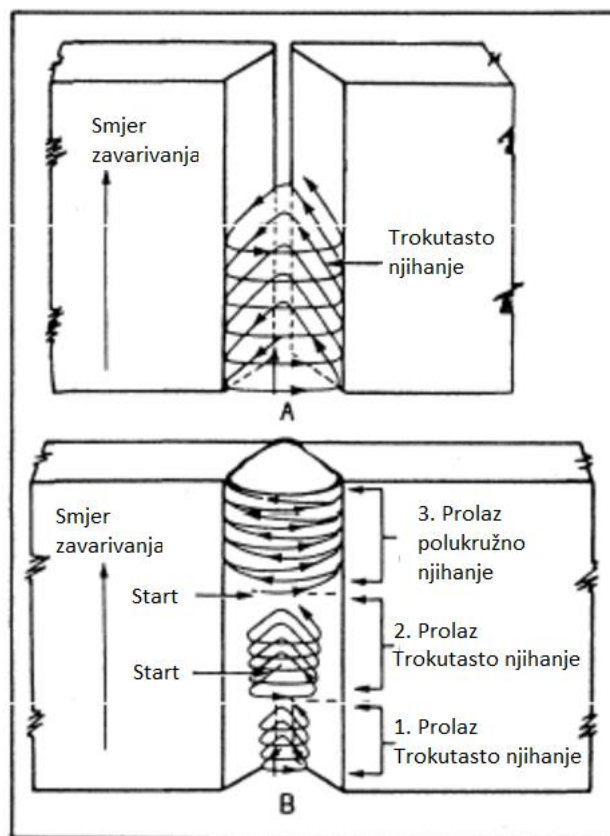
Slika 2.13. Vertikalno zavarivanje prema gore i dolje [8]

Zavarivanje kutnih spojeva u vertikalnom položaju izvodi se kao što je prikazano na slici 2.14. Počinje se od dna i prema gore se pomiče elektroda koja je pod kutom od 90° u odnosu na spoj, a obrazac njihanja je u obliku trokuta (slika 2.14. a). Radi bolje penetracije rubova i protaljivanja korijena lagano se zastaje na označenim točkama. Ako dođe do pregrijavanja taline potrebno je brzo pomaknuti pištolj od taline (slika 2.14. b) bez prekidanja luka, kako ne bi došlo do curenja taline prema dolje. Kako bi se zadržala željena širina zvara pištolj je potrebno vratiti u talinu nakon kratkog vremena. Više prolazno vertikalno zavarivanje kutnog spoja izvodi se s krivuljom njihanja koje prikazana na slici 2.14. c) i d), a kratko zadržavanje na krajevima osigurat će dobro protaljivanje bez stvaranja ugorina. Preklopni vertikalni spojevi zavaruju se kao što je prikazano na slici 2.14. e) i f).



Slika 2.14. Vertikalno zavarivanje preklopnog i T spoja [10]

Sučeljeni spojevi koje se zavaruju vertikalno i pripremaju se kao i za položeno, horizontalno zavarivanje. Dobra protaljenosti i penetracija dobiva se održavanjem kratkog električnog luka i dobrom kontrolom njihanja pištolja. Limovi debljine do 7 mm zavaruju se u jednom prolazu tehnikom njihanja prikazanoj na slici 2.15. a), a za limove debljina većih od 15 mm potrebno je više prolaza. Na slici 2.15. b) prikazana je tehnika njihanja za više prolaza. Sprečavanje ugorina izvodi se zadržavanjem na krajevima zavarenog spoja [10].



Slika 2.15. Vertikalno zavarivanje, sučeljeni spoj [10]

Nadglavni položaj

Tehnika njihanja za nadglavni položaj zavarivanja prikazana je na slici 2.16. Koristi se cik-cak tehnika njihanja sa kratkim zaustavljanjem na rubovima spoja. Ista tehnika njihanja koristi se za zavarivanje svih prolaza (korijenski, popuna i završni prolaz) [8].



Slika 2.16. Tehnika njihanja kod nadglavnog zavarivanja [8]

2.2. Dodavači žice i pištolji za zavarivanje

2.2.1. Pištolji za zavarivanje

MIG/MAG proces zavarivanja zahtijeva da dodatni materijal u obliku žice dolazi do pištolja za zavarivanje (slika 2.17.) pri konstantnoj brzini i da se struja preko kontaktnih vodilica prenese na tu žicu. Pištolj mora imati sapnicu koja formira pravilan oblik strujanja zaštitnog plina. Pištolj sadrži i prekidače za kontrolu paljenja električnog luka odnosno dodavača žice i puštanja zaštitnog plina. Kod zavarivanja sa visokim strujama potrebno je hladiti pištolj kako ne bi došlo do njegovog pregrijavanja. Sve navedeno pištolj za zavarivanje sadrži u sebi. Naravno pištolj uz sve te dijelove ne smije biti previše težak kako bi bio udoban za korištenje [2].



Slika 2.17. Poprečni presjek tipičnog pištolja za MIG/MAG zavarivanje: A – ergonomski oblikovana drška; B – kontaktna vodilica; C – sapnica plina; D – plinski difuzor; E – konektor za napajanje; F – središnje crijevo koje sadrži crijevo za plin/polikabel; G – prekidač; H – zamjenjiva košuljica; I – prilagodljiva mlaznica [2]

2.2.2. Dodavači žice

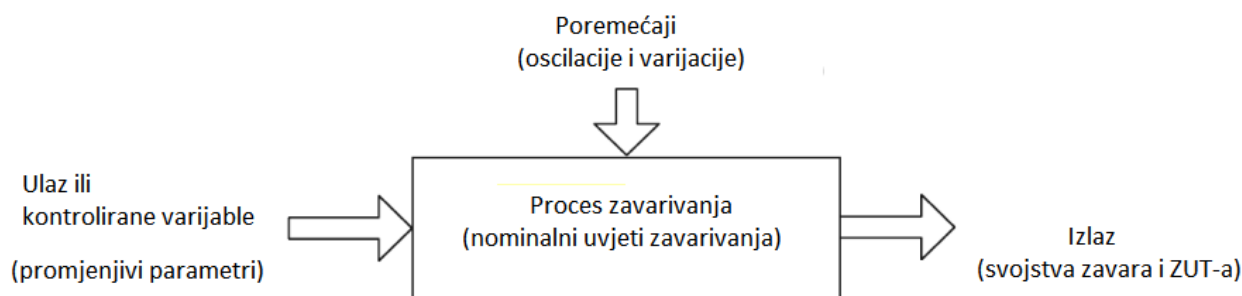
Postoje tri osnovne vrste dodavača žice: *push* sustav, *pull* sustav i *push-pull* sustav. Kako ime govori *push* sustav gura žicu kroz poli kabel pomoću kotačića u uređaju za dodavanje žice. Ako gura aluminijsku žicu postoji velika vjerojatnost da će žica zaglaviti u poli kabl, što dovodi do nepravilne brzine dodavanja žice. Takvi dodavači žice ograničeni su na minimalnu debljinu žice od 1,6 mm i duljine polikabla od maksimalno 3,5 m. *Pull* sustav koristi set kotačića u pištolju koji vuku žicu s koluta. Takav dodatak na pištolju povećava njegovu masu i ne povećava mogućnos upotrebe duljeg poli kabla, već samo omogućuje upotrebu žica manjih promjera do 0,8 mm. *Push-pull* sustav je kombinacija navedena dva sustava. Takav način dobave žice omogućuje dobavu tanke žice kroz polikabel duljine i do 15 metara. Svi navedeni sustavi dobave žice moraju osigurati konstantu brzinu dobave žice i moraju biti u mogućnosti vrlo brzo mijenjati brzinu dobave žice ako je to potrebno. Kod ručnog zavarivanja mogu se koristiti svi navedeni dobavljači žice, dok je kod robotiziranog zavarivanja postao standard korištenja *push-pull* sustava kako bi se osigurala visoka preciznost brzine dobave [2].

2.3. Postupak zavarivanja kao sustav

Kod tipičnog zavarivanja taljenjem metala (kao što je elektrolučno zavarivanje, lasersko zavarivanje, zavarivanje elektronskim mlazom, elektrootporno zavarivanje) izvorom topline zagrijavaju se krajevi dvaju materijala koji se žele spojiti. Glavna uloga zavarivanja taljenjem je omogućiti da se dva materijala međusobno spoje u solidificiranu cjelinu, koja nastaje miješanjem njihovih rastaljenih krajeva i dodatnog materijala (moguće spajanje i bez dodatnog materijala). Ako se kod toga postupka pravilno ne kontroliraju relativno kompleksni procesi, nastali spoj imat će loša mehanička svojstva, a svojstva metala oko spoja (zona utjecaja topline, ZUT) će zbog degradacije biti lošija od svojstava osnovnog materijala. Svako zavarivanje podrazumijeva sljedeća dva kriterija: prvo, dva odvojena osnovna materijala nakon zavarivanja moraju postati jedan komad; drugo, taj nastali komad mora imati (unaprijed) predviđena mehanička svojstva koja odgovaraju eksploatacijskim uvjetima. Važno je da zavareni spoj zadovoljava zahtijevane uvijete, kao što su vlačna čvrstoća, udarna i dinamička svojstva. Očigledno je da na krajnja svojstva utječe kemijski sastav, zagrijavanje, hlađenje i solidifikacija zavara. Važno je napomenuti da se zbog toplinskih promjena zagrijavanja i hlađenja svojstva zone utjecaja topline mogu razlikovati od svojstava osnovnog materijala.

Iz navedenog se da zaključiti da se proces zavarivanja može shvatiti *kao sustav koji generira izlaz pomoću ulaza*. Teoretski, sva svojstva zavarenog spoja i ZUT-a su *izlaz* sustava za koji imamo određene kriterije. Svi prilagodljivi parametri zavarivanja kao što su, unos topline, jakost i vrsta struje, napon električnog luka, brzina žice i brzina zavarivanja, mogu se koristiti kao *ulaz* sustava

i namjestiti se tako da proizvedu željeni *izlaz*. Na slici 2.18. prikazan je proces zavarivanja kao sustav čiji izlaz ovisi o uvjetima zavarivanja (koji određuju dinamički model sustava) koje je moguće kontrolirati pomoću kontroliranih varijabli ili ulaza (promjenjivi parametri zavarivanja) i o poremećajima koji nisu predvidivi (oscilacije ili varijacije uvjeta zavarivanja od nominalnih konstanti). Zbog tih poremećaja određene varijable na ulazu u sustav mogu dovesti do situacije da izlaz ne bude onakav kakav se očekuje. Zbog toga je potrebno nadgledanje neke od navedenih dijelova sustava, poremećaja, proces zavarivanja ili izlaz [11].



Slika 2.18. Proces zavarivanja kao sustav [11]

2.3.1. Praćenje procesa zavarivanja

Važno je koristiti metode praćenja koje su brze i robusne u odnosu na vrijeme detektiranja i broj netočnih uzbuna. Iz tog razloga potrebno je koristiti takve sustave kod kojih je moguće prilagođavati broj promatranih parametara za svake slučajeve, a opet treba imati na umu da isti moraju osiguravati pozitivni omjer kvalitete i produktivnosti.

2.3.1.1. MAG zavarivanje kratkim spojevima

Kako bi se dobio zavareni spoj uniformne kvalitete potrebno je osigurati stabilan proces zavarivanja. Eksperimenti pokazuju da se kod zavarivanja kratkim spojevima, optimalan proces dobiva kada frekvencija kratkih spojeva odgovara frekvenciji osciliranja taline zavara. Optimalna stabilnost procesa može se opisati:

- maksimalnom brzinom kratkih spojeva (broj/s),
- minimalnom standardnom devijacijom brzine kratih spojeva,
- minimalnom masom materijala prenesenog po kratkom spoju,
- minimalnim gubicima nastali prskanjem.

Očekivano je da devijacija optimalnih parametara dovodi do povećane vjerojatnosti nastanka prskanja, nejednakosti visine zavara i ostalih grešaka nastalih prilikom skrućivanja zavara. Praćenje parametara osigurava pravovremeno reagiranje na njihovo odstupanje i sprečavanje nastajanja posljedica u obliku grešaka. Praćenjem napona električnog luka i korištenjem njegovih varijacija moguće je kontroliranje nepravilnosti zavarenog spoja. Varijacija napona je robusna

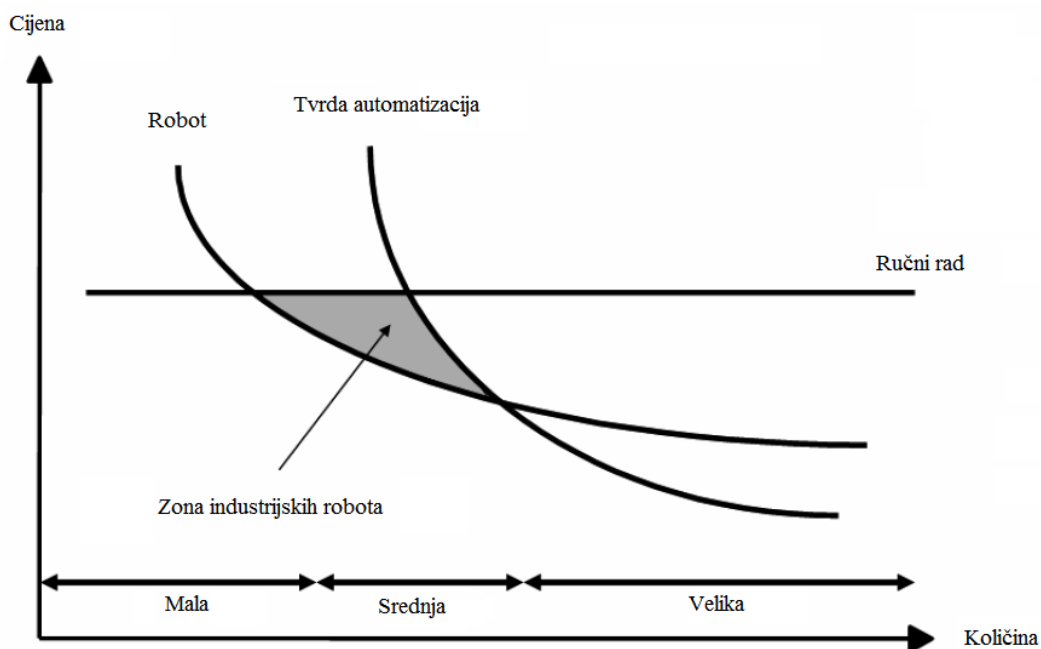
značajka i u odnosu na značajke kao što je broj kratkih spojeva i vrijeme trajanja električnog luka njome je moguće detektirati nepravilnosti zavarenog spoja.

2.3.1.2. MAG zavarivanje štrcajućim lukom

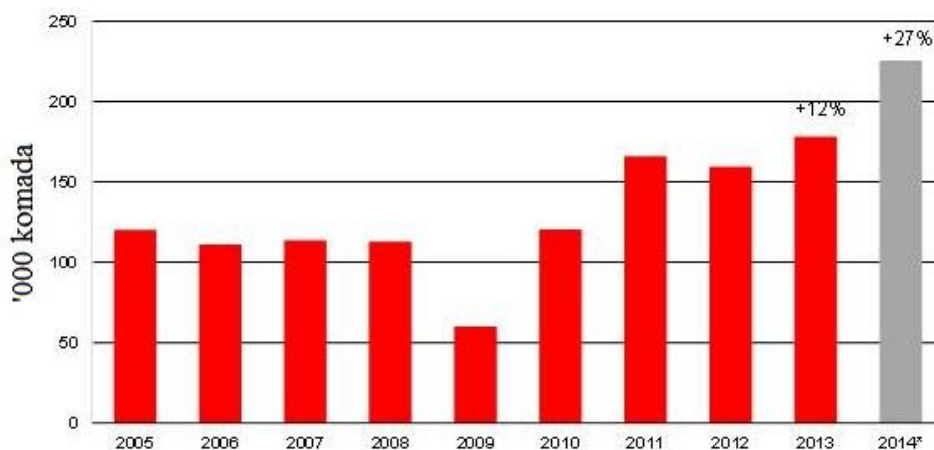
Zbog samo regulirajuće vrijednosti napona luka i mnogo većoj oscilaciji struje zavarivanja, pogodan parametar za detekciju kvalitete zavora u štrcajućem luku MAG zavarivanja je srednja vrijednost struje zavarivanja. Osim što utječe na vrstu prijenosa dodatnog materijala struja zavarivanja utječe i na penetraciju, širinu, dubinu, brzinu izgaranja, i stabilnost električnog luka. Navedeno je još jedan razlog da se srednja vrijednost struje zavarivanja drži konstantnom i stabilnom. Odabirom odgovarajućeg statističkog algoritma detekcije moguće je detektirati promjene u zavarenom spoju koje uzrokuju smanjenu kvalitetu. To je moguće kombinirati s funkcijom odluke koja se nakon vremena akumulira i određuje vrijednost pri kojoj će doći do pokretanje alarma za detekciju grešaka u zavarenom spoju. Kao i kod kratkog spoja definirane vrijednosti moraju se određivati korak po korak [11].

3. ROBOTI

Današnji tržišni uvjeti kompatibilni su većinom samo s proizvodnim pogonima malih i srednjih serija proizvodnje, zbog jake konkurencije i dinamičkog ponašanja tržišta. U takvim uvjetima najbolji odnos cijene po komadu daje proizvodnja bazirana na robotima, ako se uspoređuje sa ručnom proizvodnjom i s proizvodnjom na tvrdim automatiziranim sustavima (slika 3.1.). Industrijski roboti se smatraju temeljem kamencem konkurentne proizvodnje, koja je usmjerena na kombinaciju visoke produktivnosti, kvalitete i prilagodljivosti uz minimalne troškove. *World Robotics* 2014 godine bilježi prodaju više 200 000 industrijskih robota, što je povećanje za 27% u odnosu na 2013 godinu (slika 3.2.). Najveći rast robota je u automobilskoj industriji, a slijedi ga industrija elektronike [12-14].



Slika 3.1. Prikaz zone korištenja industrijskih robota [12]

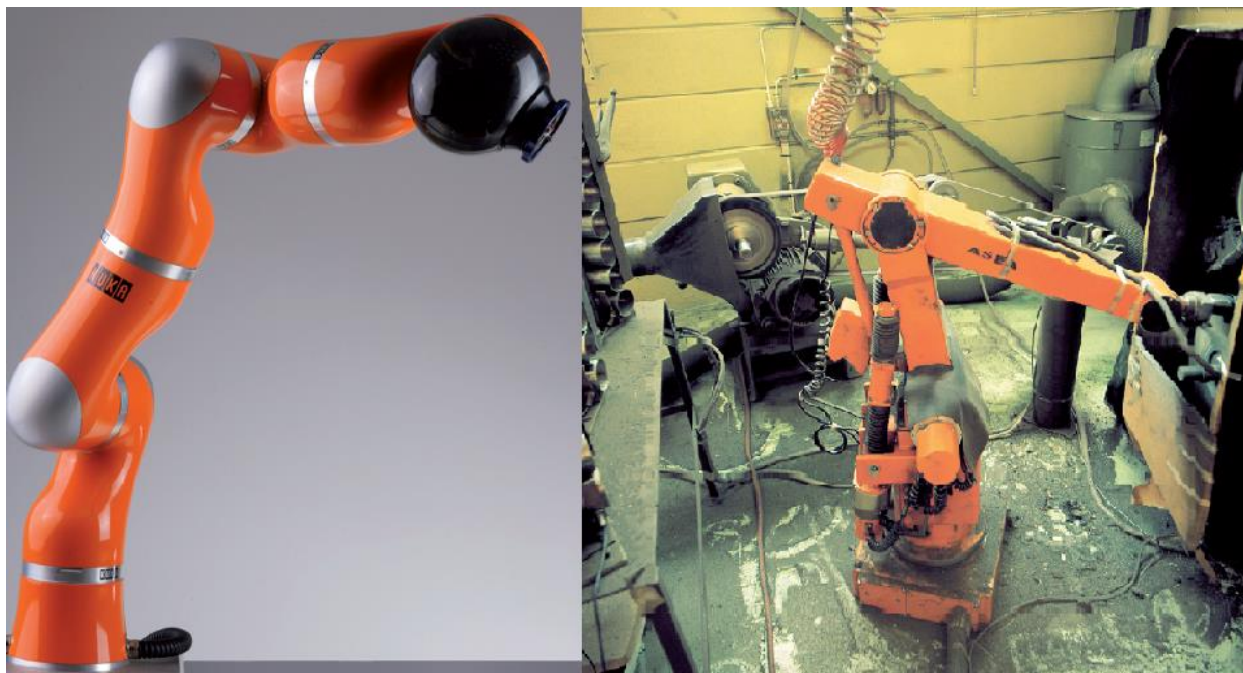


Slika 3.2. Svjetska godišnja opskrba industrijskih robota (2005 – 2014) [13]

Proizvodnja industrijskih robota, planiranje, integracija i operacije robota na radnim stanicama izrazito su neovisni inženjerski zadaci. Kako bi se roboti proizvodili u zadovoljavajućim količinama, konstruktori robota moraju udovoljiti širokim zahtjevima različitih aplikacija. Kako je to teško postići u praksi, pojavili su se brojni roboti za različite kategorije aplikacija kao što je montaža, paletiziranje, bojanje, zavarivanje, strojna obrada i generalni zadaci rukovanja. Općenito, robotska ćelija se sastoji od jednog ili više robota sa kontrolama i robotskim periferijama: držači ili alat, sigurnosni uređaji, senzori, i komponente za prijenos dijelova. Tipična cijena kompletne robotske ćelije je otprilike četiri puta veća od cijene samoga robota. Robotska ćelija je obično rezultat prilagođenog planiranja, programiranja i konfiguriranja, koje zahtijeva inženjersku stručnost. Standardizirane inženjerske metode, alati i primjeri iz prakse dostupni su kako bi smanjili cijenu i omogućili bolje performanse. Današnji industrijski roboti uglavnom su rezultat intenzivno-kapitalističke proizvodnje velikih količina proizvoda, uglavnom definiran od strane automobilske, elektroničke industrije i industrije električnih uređaja. Budući industrijski roboti će pratiti nove konstrukcijske principe obraćajući pažnju na širok raspon aplikacija u industriji. Nove tehnologije, posebno one u informatičkoj tehnologiji (IT), imat će povećani utjecaj na konstrukciju, performanse i cijenu industrijskih robota. Ono što čini robotiku tako zanimljivom je činjenica da je to znanost genijalnih uređaja, konstruiranih sa preciznošću, pogonjenih sa stalnim izvorom energije, i fleksibilnošću sa strane programiranja. Dostupnost moćnih API-sa (aplikacijsko programsko sučelje) i definiranih standarda za hardver i softver, omogućuje istraživanje gdje je dobar pristup resursima ključan za stvaranje i implementiranje novih ideja [12, 14].

3.1. Povijest robota

Robotika se može pratiti sve do 270. godine prije nove ere kada je grčki izumitelj i matematičar Cetesibius izumio vodeni sat i pisao prve rasprave o znanosti komprimiranog zraka i njegovoj koristi u pumpama. U kombinaciji s radom o elastičnosti zraka u pneumatici dobio je titulu oca pneumatike. Njegove radove pratili su Phylo od Bizanta autor knjige „Kompendij mehanike“, Heron od Aleksandrije (85 p. n. e.) i Marcus Vitruvius (25 p. n. e.). U 12. stoljeću arap Badias-zaman al-Jazari (1150-1220) sakupio je neka grčka otkrića u knjigu „Znanost o domišljatim uređajima“. Glavni problem tadašnjeg doba je bila mehanika, i način kako generirati i prenositi gibanje. Leonardo da Vinci u 15. stoljeću indirektno pokazuje nedostatak tadašnjeg vremena, nedostatak preciznosti i stalnog izvora energije. Razvio je brojne mehanizme koji generiraju i prenose gibanje, čak i načine spremanja male količine mehaničke energije. Zbog nedostatka sredstava za izradu tih mehanizama s dovoljnom preciznošću i bez trajnog izvora energije (pneumatska, hidraulička ili električna) nije uspio završiti svoj projekt viteza robota koji je trebao biti postavljen u „Salle delle Asse“ dvorac obitelji Sforza (Milano, Italija). Nikola Tesla je krajem 19. stoljeća napravio veliki doprinos u načinu kontroliranja automata na daljinu. Korištenjem radio valova demonstrirao je svoju ideju na minijaturnoj podmornici 1905. u New Yorku. Problem ovoga izuma je nedostatak inteligencije stroja. Robot bi trebao moći raditi programirane operacije, i imati nekakav stupanj slobode kako bi mogao izvršavati željene zadatke. Kada je to postalo moguće, razvoj robota je naglo porastao, a prvi industrijski robot se pojavio 1961. u General Motors tvornici, za vađenje dijelova iz stroja za lijevanje. Većina tih robota prodano je iste godine za rukovanje radnim komadima i za elektrootporno zavarivanje karoserija automobila. Obje aplikacije robot je obavljao zadovoljavajuće, te su uskoro mnoge kompanije počele razvijati i proizvoditi industrijske robote. Prvu robotsku ruku (Stanford Arm) sa 6 stupnjeva sloboda konstruirao je Victor Scheinman 1969. Svih šest stupnjeva slobode kontrolirano je električno pomoću standardnog računala PDP-6 proizvođača Digital Equipment Corporation. Ne antropomorfna kinematička konfiguracija sa jednom prizmatičnom i pet rotacijskih zglobova konfigurirano je tako da jednadžbe potrebne za opis takvoga gibanja budu dovoljno jednostavne tako da se mogu relativno brzo izračunavati. 1973. kompanija ASEA (danas ABB) predstavila je prvi mikroračunalno-kontrolirani u potpunosti električni industrijski robot IRB-6 (slika 3.3. desno), koji je mogao pratiti kontinuiranu putanju, predodređenu za elektrolučno zavarivanje ili obradu odvajanjem čestica. Robot je bio vrlo robustan i imao je radni vijek od 20 godina u surovoj okolini (navod proizvođača robota ABB).



Slika 3.3. KUKA robotska ruka sa 7 stupnjeva slobode gibanja i omjera težine i opterećenja 1:1(lijevo), robot za praćenje kontinuirane putanje IRB-6 (desno) [14]

70-tih godina prošlog stoljeća intenzivno se rasprostranjuju roboti u proizvodnji automobila korišteni najviše za elektrootporno točkasto zavarivanje i za aplikacije rukovanja. Prvi SCARA (selective compliance assembly robot arm) izumio je Hiroshi Makino 1978. na Yamanshi sveučilištu u Japanu. Potrebe u pogledu brzine i mase dovele su do novih konstrukcija kinematike i prijenosa. Primarni cilj istraživanja bilo je smanjiti masu i inerciju strukture robota gdje se ljudska ruka smatrala ultimativnom mjerom s omjerom težine i opterećenja 1:1. 2006. postignut je taj cilj od strane kompanije KUKA, s kompaktnom robotskom rukom 7-DOF (Degree of Freedom) (slika 3.3. lijevo) s naprednom sposobnošću kontroliranja sile [12, 14].

3.2. Strukture robota

Glavna uloga konstruktora sastoji u proizvodnji robota koji će moći udovoljiti svim zahtjevima i specifikacijama radnog procesa u kojim bi trebao obitavati. Različite faze u konstruiranju su:

1. odrediti topologiju kinematičkog lanca osnovne mehaničke konstrukcije. Pod tim se podrazumijeva da se prvo odredi tip robota: serijski, paralelni ili hibridni,
2. odrediti geometrijske dimenzije veza robota i na taj način definirati robotsku arhitekturu, kako bi se mogla popuniti *Denavit-Hartenberg* tablica parametra koja zadovoljava potrebe radnog prostora,
3. odrediti strukturalne dimenzije svih veza i spojeva, kako bi se zadovoljila potrebna opterećenja, gdje opterećenja predstavljaju sile i momente,

4. odrediti strukturalne dimenzije svih veza i spojeva, kako bi se zadovoljila potrebna dinamička opterećenja,
5. odrediti elastično dinamičke dimenzije sveukupne mehaničke konstrukcije robota,
6. izabrati pogone i njihove mehaničke prijenose za operacijske uvjete [15].

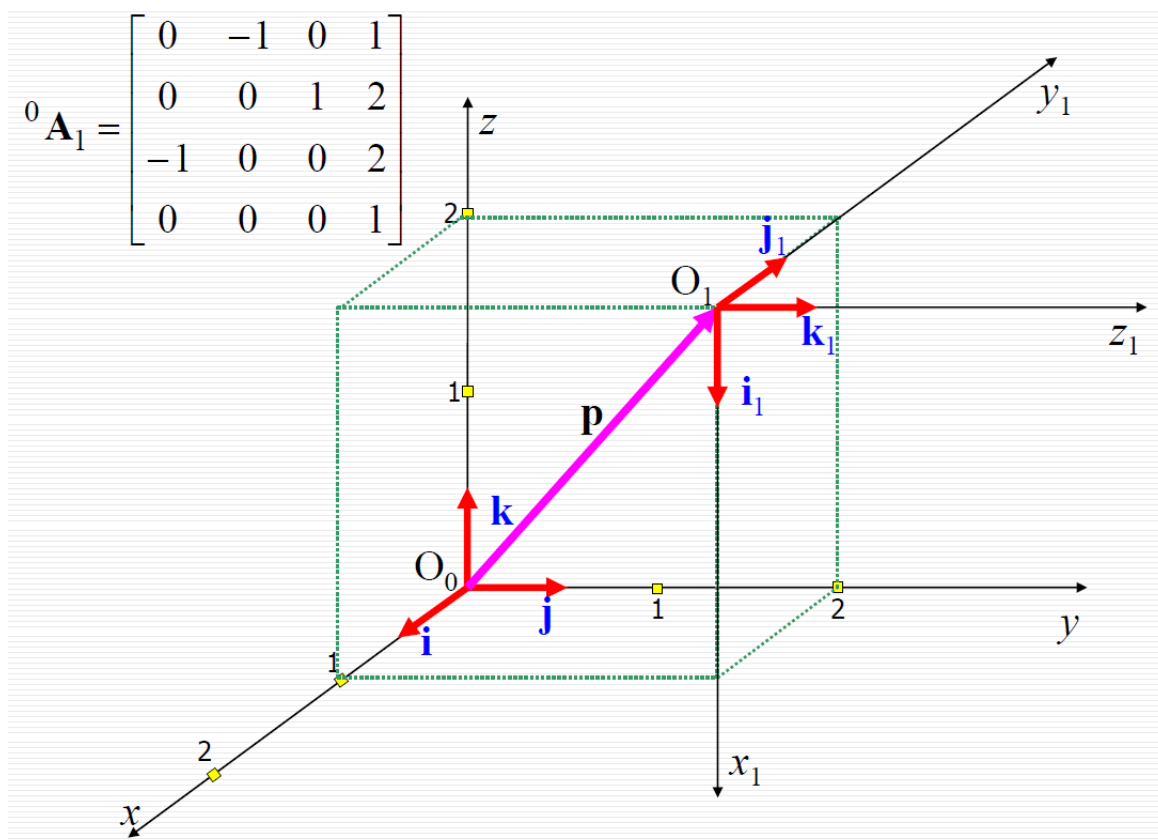
3.2.1. Kriteriji radnog prostora

Najočitije razmatranje u konstruiranju robota je ta da radni prostor ima potrebne karakteristike. To je fundamentalni problem u klasičnom konstruiranju mehanizma koji zadaje očita pitanja kako da korisnik specificira te karakteristike. Pitanje koje se ovdje razmatra odnosi se u glavnom na ono što *Vijaykumar* [16] naziva regionalna struktura manipulatora. To se odnosi na manipulatore sa rastavljivom arhitekturom, čija zadnja tri zgloba imaju istovjetne osi, te na taj način formiraju sferni zglob, a točka spajanja tih osi je centar zgloba. Manipulacijski zadaci ove vrste arhitekture omogućuju razdvajanje, pozicioniranja i orijentacije na pod zadatke: lokalne strukture, koja se sastoji od prva tri spoja, čiji položaj omogućuje pronalazak središta zgloba određene točke C (x , y , z); onda se, lokalna struktura, zglob, namješta tako da krajnji dio dobije takvu orijentaciju u odnosu na postolje, koja je definirana matricom orijentacije. Većina algoritama u literaturi odnosi se na radne prostore lokalne strukture [15].

3.2.2. Matrica homogene transformacije

Velika je praktičnost u mnogim područjima uključujući i robotiku predstaviti svako kruto tijelo u gibanju sa matricom transformacije. Na taj način moguće je množenjem matrice homogene transformacije definirati položaj i orijentaciju jednog koordinatnog sustava u odnosu na drugi. Svrha upotrebe takvih matrica je jednostavno izračunavanje veze između unutarnjih i vanjskih koordinata robota. Izraz 3.1. predstavlja izgled matrice homogene transformacije, gdje su prva tri stupca projekcije jediničnih vektora definiranog koordinatnog sustava u odnosu na nepokretni koordinatni sustav, a posljednji stupac prikazuje koordinate ishodišta definiranog koordinatnog sustava. Slika 3.4. prikazuje primjer korištenja matrice homogene transformacije [17, 18].

$$A = \begin{bmatrix} i_x & j_x & k_x & p_x \\ i_y & j_y & k_y & p_y \\ i_z & j_z & k_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.1.)$$

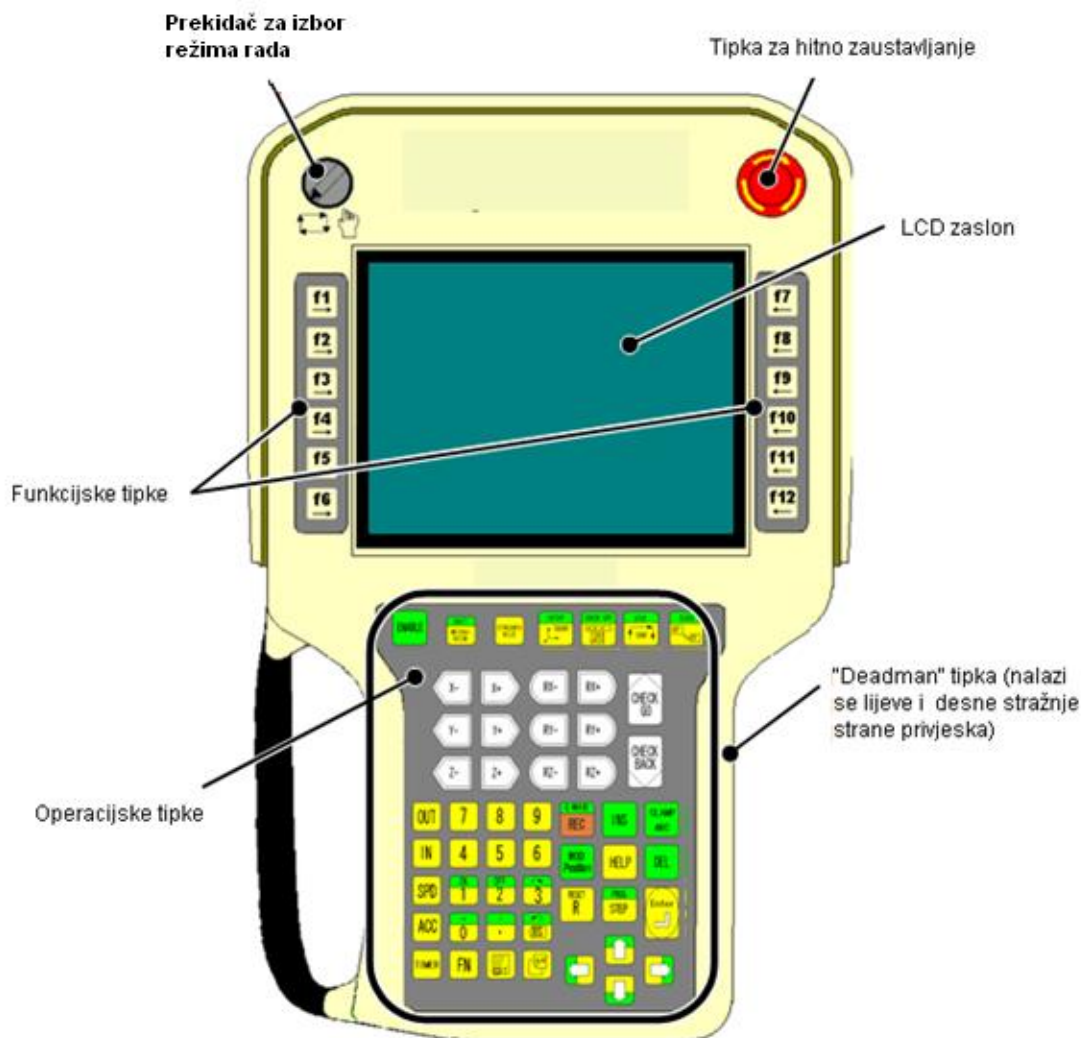


Slika 3.4. Matrica homogene transformacije u koordinatnom sustavu [17]

3.3. Metode programiranja robota

Programiranje je veza između rješenja zadatka i upravljačkog sustava robota. Osnovne metode programiranja robota su off-line, on-line i miješana metoda programiranja.

On-line programiranje izvodi se izravno na njegovom radnom položaju. Robot prilikom takve vrste programiranja ne može obavljati svoju proizvodnu funkciju. Takva metoda programiranja izvodi se privjeskom za učenje (programski uređaj) slika 3.5.



Slika 3.5. Privjesak za učenje [19]

Pomoću privjeska za učenje pomiču se zglobovi robota i pištolj za zavarivanje dovodi se u željeni položaj, te se ta točka pohranjuje u memoriju. Na taj način definira se putanja robota, a definirane točke se spremaju i nakon kompletnog programiranja definiranu putanju je moguće koristiti za izvođenje procesa. Valja napomenuti da tijekom takvog učenja robot ne može zavarivati.

Off-line programiranje obavlja se na nekom drugom mjestu, odnosno veza između robota i mjesta programiranja ne postoji. Kod ovakvoga programiranja svi potrebni parametri putanje pištolja i procesa zavarivanja definiraju se u nekom od programskih jezika. Nakon programiranja program se sprema i ubacuje u upravljačku jedinicu koja može čitati taj programski jezik i robot počinje svoj rad kako je programom definirano. Problem ovakvog programiranja je moguća kolizija s radnim komadima ili dobivanje potrebnih tolerancija jer je vrlo teško u nekom od CAD programa definirati radnu okolinu robota u točnim dimenzijama.

Miješana metoda programiranja koristi prednosti obje gore navedene metode.

Navedeni načini programiranja imaju svoje podskupine tako da u skupinu on line programiranja pripada programiranje kretanjem po stazi (direktno) i programiranje postavljanjem u točku (indirektno). Programiranje kretanjem po stazi vrši se na način da operater uz pomoć upravljača (slika 3.6.) priključenog na robotsku ruku i kontrolnu ploču zadaje stvarne pokrete oko željenog komada. Putanja i krajnje točke snimaju se rutinski pomoću uzorkovanja kod kojeg se bilježe točke 60 do 80 puta u sekundi. Kada se program pusti rezultat je glatko kontinuirano gibanje robotske ruke. Ovakav način programiranja zahtijeva veliku količinu memorije. Programiranje se vrši pri jako malim brzinama, a kada se robot pusti da automatski prati putanju moguće je zadavati potrebnu brzinu gibanja. Ovaj način programiranja najčešće se koristi kod robotiziranog premazivanja odnosno nanošenja adhezijskih premaza na površnu radnog komada.

Prednosti su brzo programiranje, operater ne treba imati velike vještine programiranja, programiranje na licu mjesta (on line).

Nedostaci su: modifikacija postojećeg programa moguća samo softverski (off line) što je prilično zahtjevno, limitirana veličina radnih komada (operater mora doći do svih točaka radnoga komada), neefikasno kod ravnih radnih komada ravnih površina (ploče) [17 – 20].

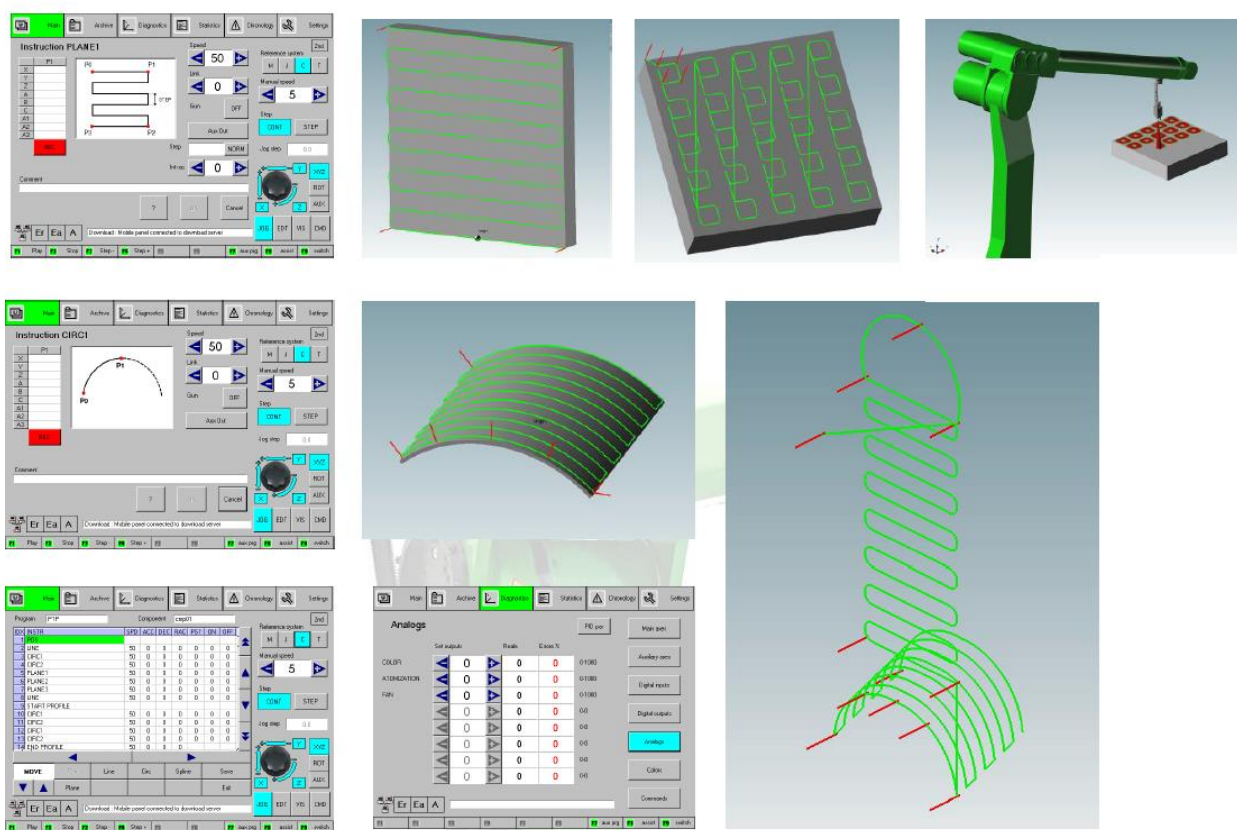


Slika 3.6. Programiranje kretanjem po stazi i upravljač na robotskoj ruci [18]

Programiranje točka po točka vrši se na način da se pomoću privjeska za učenja ručno unose točke po kojima ruka treba putovati te se iste spremaju u memoriju. Tijekom ovoga načina programiranja robot nije u proizvodnoj funkciji. Ovaj način programiranja razvijen je za potrebe robotiziranog nanošenja premaza, ali se koristi i kod robotiziranog zavarivanja.

Prednosti ovakvog programiranja su: proces je precizniji, moguće je kontrolirati sve parametre (na slici 3.7. prikazani su razni parametri koje je moguće mijenjati).

Nedostaci su: vrijeme programiranja koje je u odnosu na programiranje kretanje po stazi značajno duže, mnogo faza (programiranje, testiranje, prilagodba), potrebna veća vještina programiranja [20].



Slika 3.7. Prikaz parametara koje je moguće regulirati kod programiranja točka po točka [20]

3.4. Roboti za zavarivanje

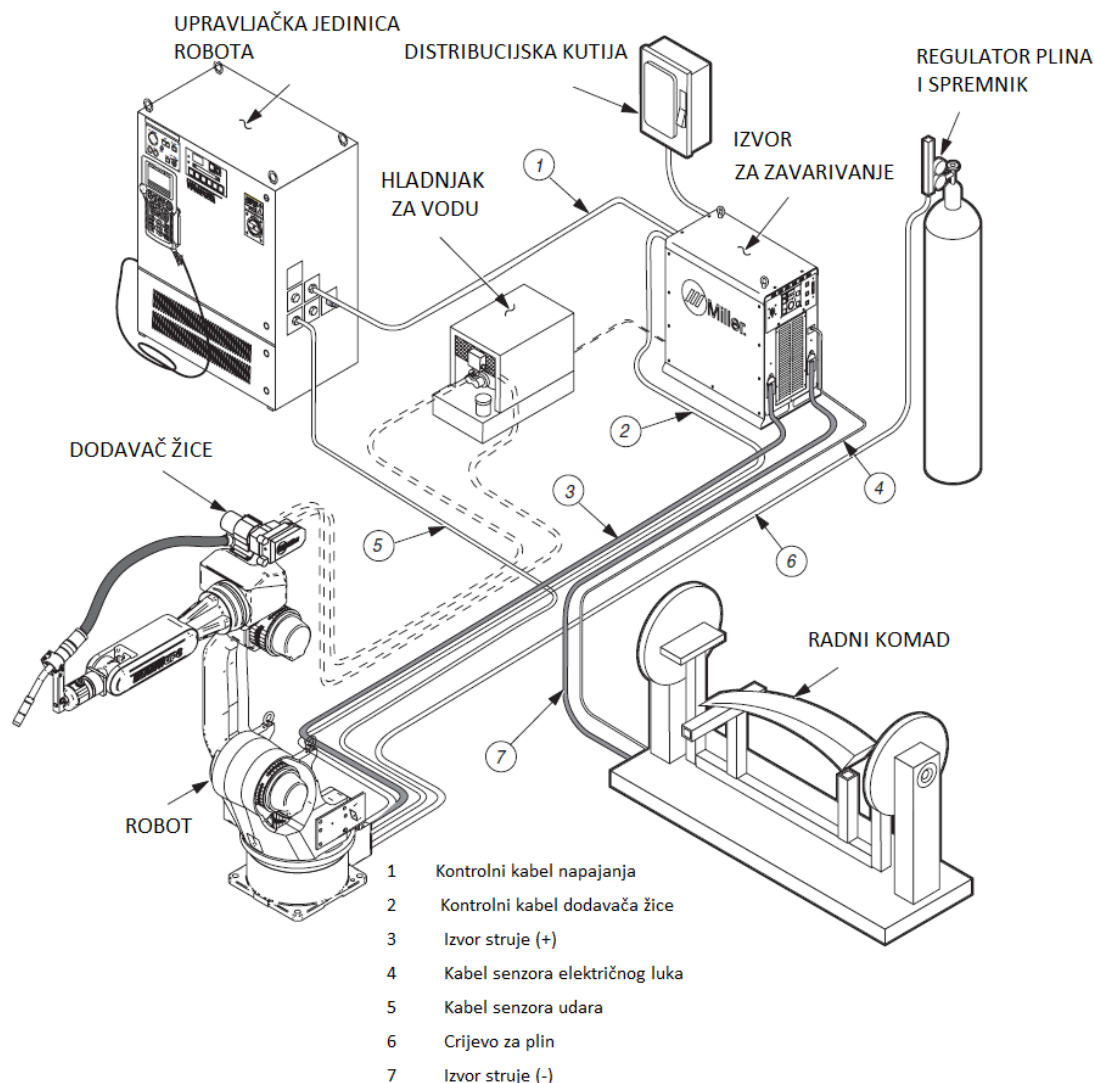
Potreba za povećanom kvalitetom proizvoda, trend automatizirane proizvodnje i potreba za većom profitabilnošću rezultira upotrebom industrijskih robota u modernoj proizvodnji. Otkada su roboti uvedeni u industriju, 70-tih godina prošlog stoljeća, njihova najčešća područja primjene su od potrebe prenašanja manjih dijelova proizvoda do točkastog zavarivanja i klasičnog elektrolučnog zavarivanja.

Industrijski robot za MIG/MAG zavarivanje je univerzalni automat za gibanje s više od tri stupnja slobode koji je moguće programirati i kontrolirati pomoću senzora. Opremljen je zavarivačkim pištoljem i može izvoditi zavarivačke radove.

Jezgra modernih zavarivačkih robotskih ćelija je jedan ili više zavarivačkih robota. Najčešće imaju šest programibilnih stupnjeva slobode kako bi mogli pristupiti bilo kojoj točki svoga radnog prostora s bilo kakvom orijentacijom zavarivačkog pištolja. Kako bi se povećao njihov radni prostor roboti se mogu postavljati u nadglavne (stropne) pozicije. Dodatno povećanje radnog prostora može se postići translacijskim gibanjem robota. Takve dodatne vanjske osi su također programibilne. Pozicioniranje radnih komada vrši se pozicionerima koji imaju dodatne osi. Pozicioneri omogućuju lakše pristupanje zavarivačkog pištolja spoju kojeg je potrebno zavariti. Također se koriste višestanični ciklusni stolovi za povećanje profitabilnosti cijelokupnog sustava. Dodatne osi u obliku pozicionera, cikličnih stolova i drugih manipulatora upravljani su pomoću upravljačke jedinice robota [21].

3.4.1. Robotska stanica

Robotski zavarivački sustav integrirani je paket alata i komponenti konstruiranih za specifične zavarivačke potrebe. Uobičajeni takav sustav s komponentama prikazan je na slici 3.8.



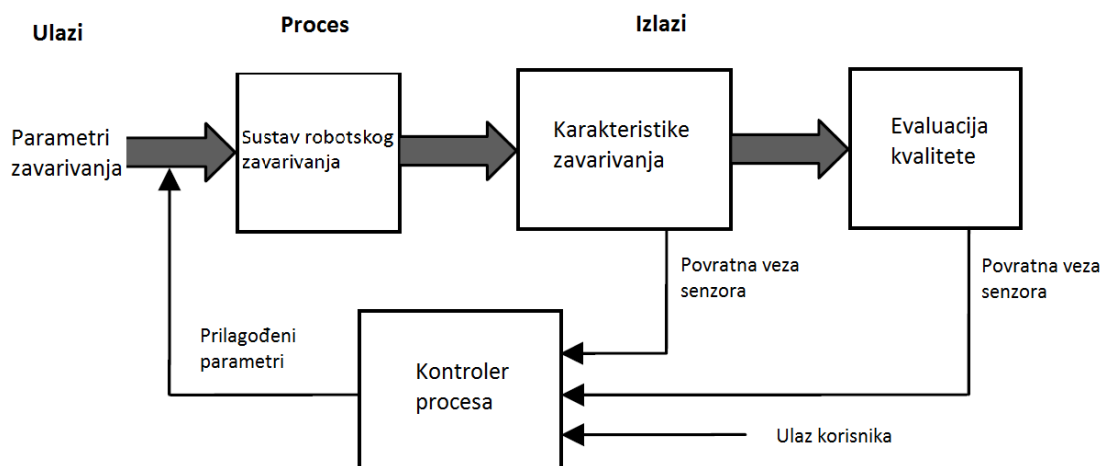
Slika 3.8. Uobičajena zavarivačka robotska stanica [22]

Upravljač (regulator) robota koordinira operacijama različitih zavarivačkih komponenti. Regulator izvršava niz naredbi koje su spremljene u radnoj datoteci robota. Kako regulator prolazi kroz niz serijskih uputa, usmjerava gibanje pištolja i upravlja izvorom za zavarivanje. Robot pomiče zavarivački pištolj i dobiva informacije kroz seriju programiranih koraka. Upravljačka jedinica kontrolira brzinu, smjer i položaj robota dok se on kreće od točke do točke. Upravljačka jedinica centar je bilo kojega industrijskog robota. Moguća je komunikacija upravljačke jedinice i s vanjskim sustavom uz pomoć glavnog računala. Moderni industrijski roboti opremljeni su s više upravljačkih procesora zbog većeg broja paralelnih kontrolnih funkcija i kalkulacija [21, 22].

3.4.2. Definicija i detekcija parametara procesa

Konstruiranje zavarivačkog robotskog sustava prvi je korak za identifikaciju srodnih parametara procesa, odnosno parametara koje je potrebno kontrolirati na takav način da se dobije zahtijevana kvaliteta (slika 3.9). Ulazni parametri procesa mogu se klasificirati u tri različite kategorije:

- 1. Primarni ulazi:** varijable koje se mogu modificirati (on-line) tijekom samoga procesa. Primarni zavarivački parametri kao što je napon, brzina dodavanja žice, i brzina zavarivanja. Tehnički, napon i brzina dodavanja žice analogni su signali upravljani od strane izvora za zavarivanje, a generirani su od strane robotskog kontrolera ili PLC-a (eng. Programmable Logic Controller). Željena brzina pištolja dobiva se upravljanjem središnjom točkom alata .
- 2. Sekundarni ulazi:** varijable koje su definirane prilikom odabira procesa i prije početka zavarivanja. Primjer tih parametara je vrsta zaštitnog plina, protok plina tijekom procesa, nagib pištolja i vrsta i promjer žice dodatnog materijala.
- 3. Fiksni ulazi:** parametri koji su fiksni i koji se ne mogu mijenjati od strane korisnika. Ti parametri su obično nametnuti od strane izabranog procesa zavarivanja. Primjer takvih parametara su geometrija spoja, debljina ploče, fizikalna svojstva ploče itd.

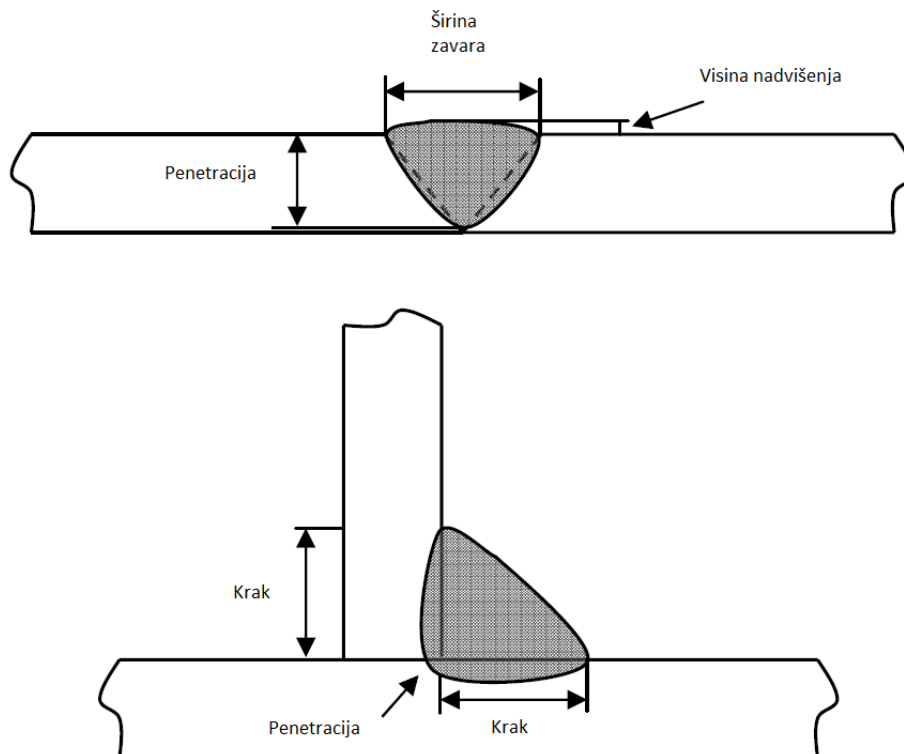


Slika 3.9. Pregled zavarivačkog kontrolnog sustava [4]

Sa navedenim parametrima potrebno je pažljivo postupati, odnosno potrebno je pravilno odabrati postavke i sekundarne varijable kako bi se moglo efikasno upravljati sa primarnim parametrima. Drugi važan skup parametara su izlazni parametri samoga zavarenog spoja. Oni određuju kvalitetu zavarenog spoja (geometrijski i metalurški parametri).

Geometrijski parametri rezultat su sveukupnog balansa procesa i definiraju način na koji će dodatni materijal popuniti zavareni spoj. Osnovni parametri koji služe za prihvatljivu klasifikaciju zavarenog spoja su penetracija, širina zavara, visina nadvišenja i poprečni presjek zavarenog spoja. Navedeni geometrijski parametri prikazani su na primjeru sučeljenog V spoja i kutnog spoja (slika

3.10.). Penetracija je vrlo važan parametar za evaluaciju kvalitete zavarenog spoja, jer povezuje način na koji se metal zavora spaja sa osnovnim materijalom tijekom procesa zavarivanja. Nažalost, vrlo je teško kontrolirati penetraciju tijekom procesa zavarivanja jer ne postoji način na koji bi se ista mjerila on-line [4].



Slika 3.10. Parametri sučeljenog spoja i kutnog spoja [4]

Način na koji se kod robotiziranog zavarivanja mjere i detektiraju značajke i parametri je upotrebom senzora. Najviše se koriste za praćenje geometrije spoja, geometrije taline i položaja pištolja i to tijekom samog procesa zavarivanja (on-line). Detaljniji opis senzora za MIG/MAG zavarivanje bit će dan u sljedećem poglavlju.

3.5. Senzori za geometrijske parametre

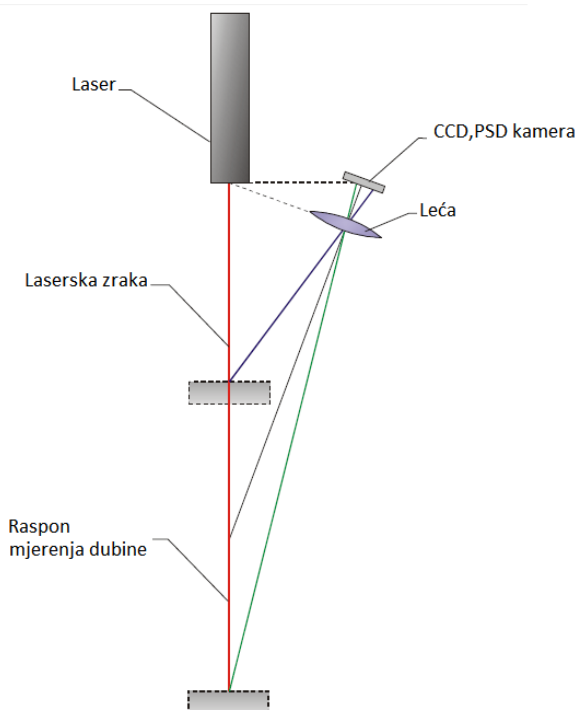
Senzori za geometrijske parametre moraju imati mogućnost prikazivanja informacija o geometriji zavarenog spoja. Te informacije su važne za mogućnost samog praćenja spoja kao i za praćenje kvalitete nastalog zavarenog spoja. Često se koriste i senzori koji služe za mjerenje pozicije i orijentacije spoja prije početka zavarivanja. Glavni izazov je ipak koristiti senzore pri samom zavarivanju jer prilikom zavarivanja atmosfera u kojoj senzori moraju moći detektirati spoj je izrazito nepovoljna (visoka temperatura, intenzivno svjetlo, visoka struja, prskanje čestica, dim...). Danas se najčešće koriste optički senzori (koji koriste laserski izvor pomoću kojeg se osvjetljuje spoj (laserski senzori) i senzori koji imaju uski filter propusnosti za izdvajanje samo

potrebnih informacija (vizijski senzori) i senzori koji koriste parametre električnog luka kao izvor informacija pomoću kojih se može odrediti kako i gdje je potrebno pozicionirati pištolj [4].

Valja napomenuti da se koriste još akustični, indukcijски i kombinacije istih za geometrijsko pozicioniranje, a i kontrolu, kako kvalitete zavora, tako i parametara zavarivanja.

3.5.1. Optički senzori

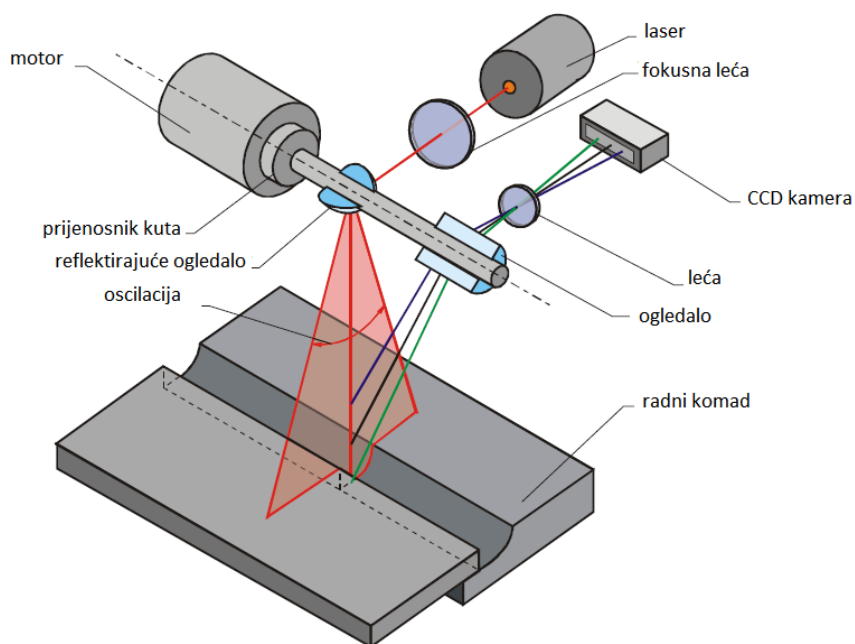
Optički senzori za mjerenje geometrije normalno su vanjski sustavi koji se pozicioniraju ispred zavarivačkog pištolja kao vodeći element. Praktično je te senzore opremiti s više osi zato jer se i senzor i pištolj moraju gibati po žljebu spoja. Za praćenje geometrije žljeba spoja najčešće se koriste senzori koji rade na principu triangulacije, a sastoje se od tri dijela: odašiljača, prijemnika i električnog procesora. Laserska zraka (odašiljač) projicira se na radnu površinu, kod koje se dio svjetlosne zrake odbija od površine i prikuplja se kroz leću do CCD (Charge-Coupled Device), CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) ili PSD (Position Sensitive Detector) detektora (prijemnika) (slika 3.11.). Kut se izračunava ovisno na koju poziciju detektora je pala laserska odbijena zraka, te se pomoću tog kuta u elektroničkom procesoru izračunava udaljenost između senzora i radnog komada [4, 21, 23].



Slika 3.11. Princip triangulacije [23]

Kod skeniranja spoja koristi se isti taj princip triangulacije samo što se sada za odbijanje laserske zrake prema radnom komadu koristi zrcalo montirano na pomičnu os koja je paralelna sa osi žljeba (slika 3.12). Takvom izvedbom postaje moguće mjerenje udaljenosti duž linije žljeba spoja i

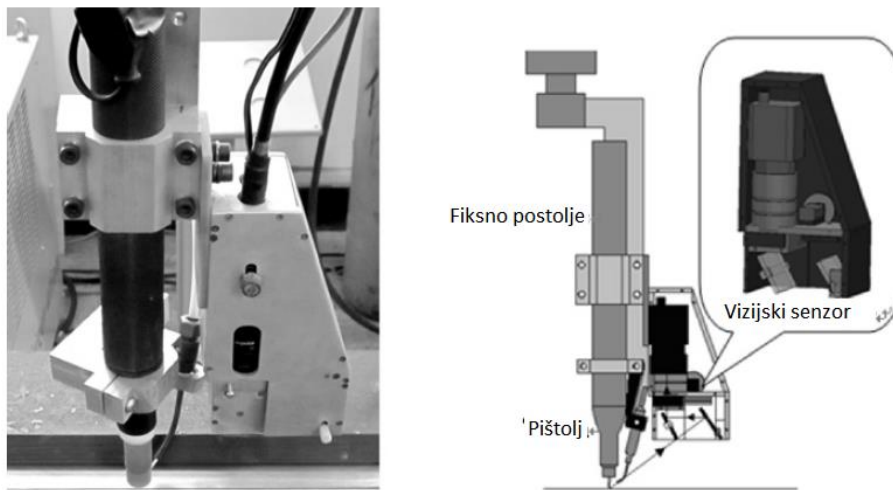
omogućuje dvodimenzionalan zapis i evaluaciju konture žlijeba. Ovim principom skeniranja moguće je dobiti kompletni trodimenzionalni prikaz zavarenog spoja ako se senzor postavi na stražnju stranu ruke robota tako da skenira gotov spoj. Iako se ovi senzori većinom koriste za praćenje konture žlijeba spoja, informacije koje se prikupe ovim senzorom mogu pokazati koliki je volumen zavarenog spoja, veličinu zazora, odstupanja itd. Moguće je, na primjer kontrolirati brzinu gibanja pištolja u ovisnosti o veličini zazora između ploča tako da, ako je slučajno njihova udaljenost veća od željene, paralelno s tom spoznajom smanjiti brzinu zavarivanja i struju zavarivanja kako ne bi došlo do protaljenja radnog komada i nastanka rupe [4, 18].



Slika 3.12. Princip laserskog skeniranja [21]

3.5.2. Vizijski senzori

Za razliku od optičkih senzora koji koriste drugi izvor za osvjetljivanje (laser), vizijski senzori ne trebaju izvor svjetlosti već koriste svjetlost električnog luka. Primjer vizijskog senzora opisanog u ovom radu prikazan je na slici (3.13.), a sastoji se od CCD kamere, grafičke kartice, automatskog transmisijskog mehanizma, sustava za prigušenje svjetla itd. Ima funkcije kao što su, identifikacija zavarivačkog okruženja, početno traženje spoja, praćenje spoja, kontrola penetracije i ručno upravljanje. U usporedbi s drugim optičkim sensorima pogotovo s laserskim senzorom, cijena izrade ovog senzora je mnogo manja (oko 1500\$), uključujući CCD kameru, leću, grafičku karticu, karticu za prikupljanje podataka itd. Troškovi za npr. laserski Meta vizijski sustav su oko 15 puta veći od ovoga [24].



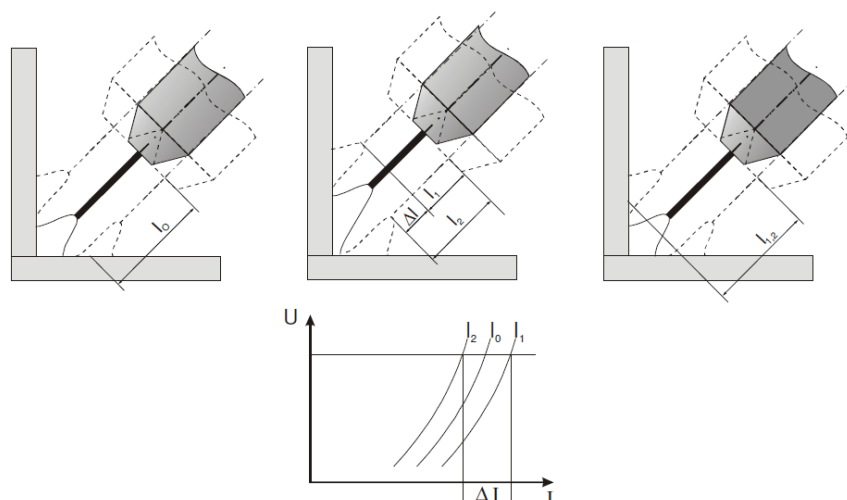
Slika 3.13. Konstrukcija vizijskog senzora [24]

3.5.3. Senzori električnog luka

Praćenje spoja služeći se njihanjem pištolja i električnog luka razvilo se 80-tih godina prošlog stoljeća. Princip ovog senzora je korištenje promjene struje koja nastupa kada se mijenja udaljenost kontaktne vodilice od radnog komada. Temeljno načelo korištenja ove pojave relativno je jednostavno i jeftino za izvedbu kod robotiziranog zavarivanja. Približna ovisnost napona luka (U), struje luka (I) i udaljenosti kontaktne vodilice i radnog komada (l) dana je jednadžbom 3.2.

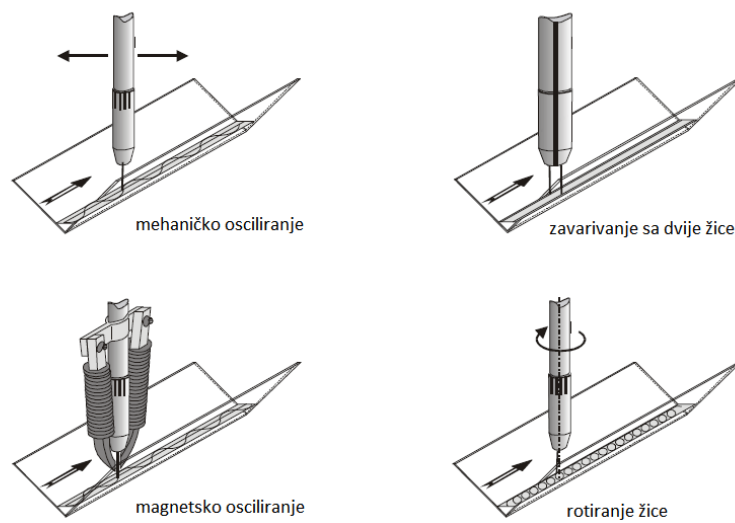
$$U = \beta_1 I + \beta_2 I + \frac{\beta_3}{I} + \beta_4 l \quad (3.2)$$

Gdje su β_1 - β_4 faktori koji ovise o vrsti žice, zaštitnom plinu i karakteristikama stroja. U većini slučajeva vanjska karakteristika stroja je takva da održava stabilni napon električnog luka (naponska karakteristika slika 2.4.). Stoga, kada se mijenja vrijednost l obrnuto proporcionalno mijenja se i struja električnog luka I (slika 3.14.). Signal za kontrolu pozicije pištolja određuje se mjerenjem razlike struja na rubovima žlijeba. Promjena struje bilježi se hallovim i shunt senzorima. Usporedbom između stvarne struje zavarivanja i programirane struje daje signal kojim se određuje kontrolna udaljenost od pištolja zavarivanja. Da bi ovaj senzor funkcionirao potrebna je divergencija električnog luka ili upotreba drugog električnog luka. Za realizaciju tog principa koriste se brojne mogućnosti prikazane na slici 3.15. [4, 21].



Slika 3.14. Senzor električnog luka [21]

Najčešće korištena metoda je mehaničko njihanje pištolja koje se izvodi rotirajućim gibanjem s frekvencijom do 5 Hz. Metoda sa dvije žice se uglavnom koristi kod elektrolučnog zavarivanja pod zaštitom praška. Magnetsko osciliranje divergira električni luk, a prednost ovog načina promjene signala je frekvencija koja je oko 15 Hz. Potreba za takvom frekvencijom je ta, jer se prilikom magnetskog osciliranja luka struja i napon zavarivanja mijenjanju periodički, a porastom frekvencije iznad 15 Hz smanjuje se magnetski tok elektromagneta zbog elektromagnetskog induktiviteta te dolazi do manje varijacije napona električnog luka. Nedostatak je veličina potrebnih elektromagneta i pristupačnost radnom komadu koja se zbog toga gubi. Zadnja varijanta senzora električnog luka koristi rotiranje žice zavarivanja, a u tom slučaju frekvencija promjene električnog luka dostiže vrijednost od 30 Hz. Princip senzora električnog luka limitirana je na spojeve koji imaju definirane bočne strane. Zajedno s taktilnim senzorom na mlaznici pištolja, čini kombinaciju koja se redovito koristi za pronalaženje i praćenje spoja tijekom robotiziranog zavarivanja [5].



Slika 3.15. Načini detektiranja promjene signala kod senzora električnog luka [21]

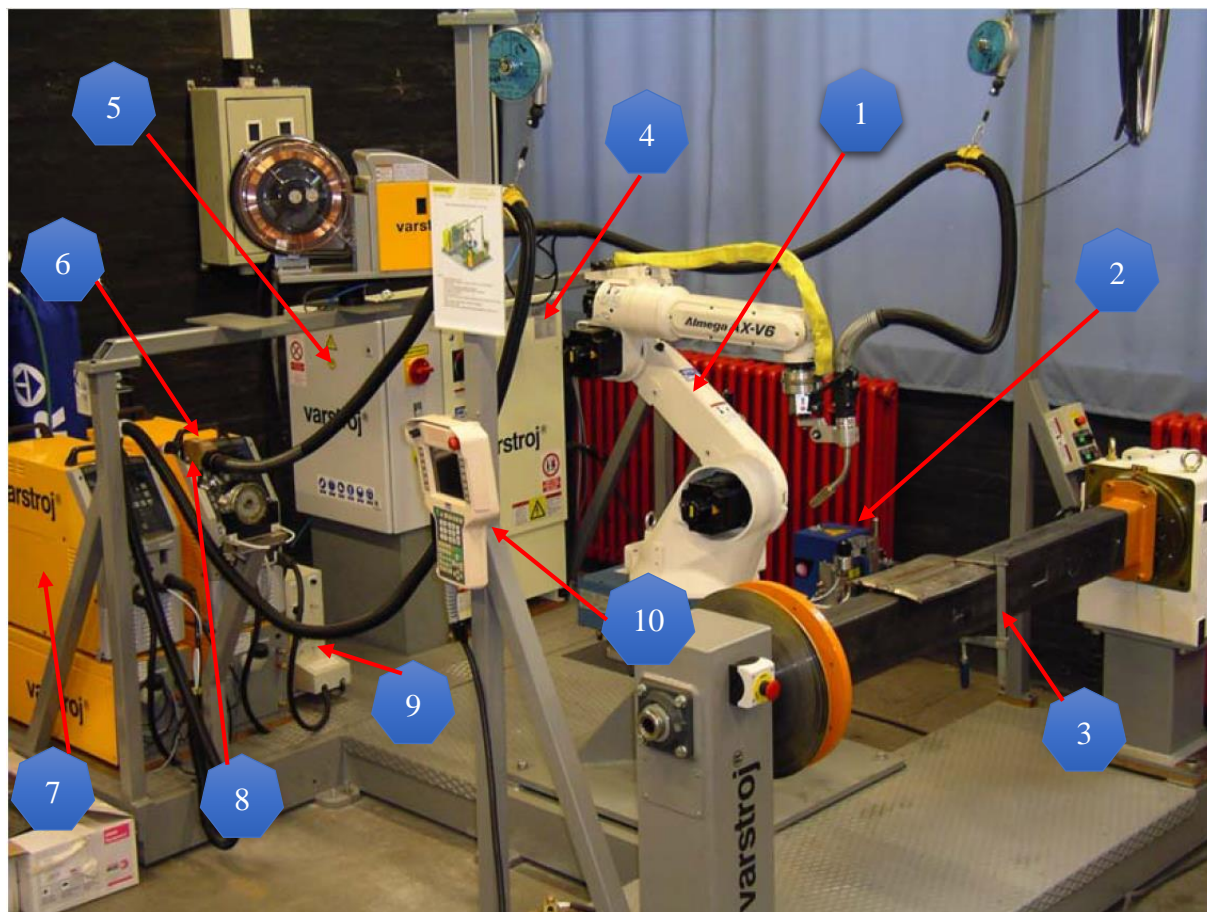
4. EKSPERIMENTALNI DIO

Eksperimentalni dio rada sastoji se od dva dijela. U prvom dijelu rada snimljena je i analizirana tehnika njihanja za stvarno izvedene zavarene spojeve. Cilj snimanja krivulja je odrediti koja vrsta krivulja je povoljna za zavarivanje korijena. U drugom dijelu rada prikazan je utjecaj tehnike njihanja na oblik i dimenzije navara i na temelju dobivenih rezultata odabrana je optimalna tehnika njihanja.

4.1. Robotska stanica

Za potrebe izvođenja eksperimenta korištena je robotska stanica u Laboratoriju za zavarivanje Fakulteta strojarstva i brodogradnje, prikazana je na slici 4.1. Navedena robotska stanica sastoji se od 10 komponenti:

1. robota OTC Almega AX-V6,
2. naprave za čišćenje sapnice, skraćivanje žice dodatnog materijala i nanošenja sredstva protiv naljepljivanja kapljica,
3. pozicionera P250V ROBO,
4. električne jedinice,
5. upravljačke jedinice,
6. izvora struje MIG/MAG VPS 4000,
7. izvora struje TIG VARTIG 3500 DC/AC,
8. sustava za automatsku izmjenu pištolja
9. senzora za praćenje električnog luka AX-AR,
10. privjeska za učenje.

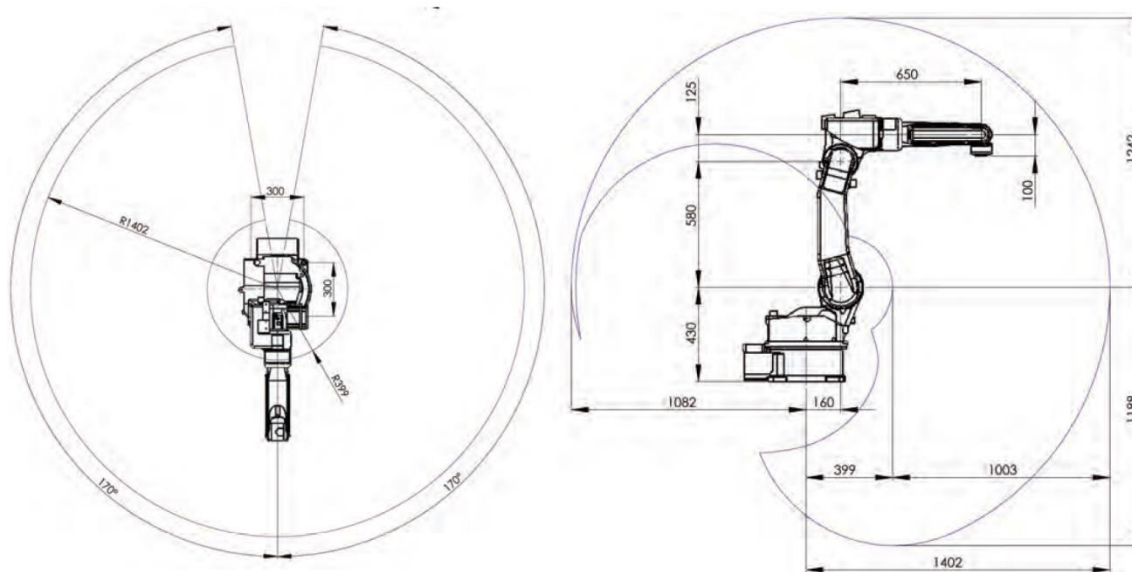


Slika 4.1. Robotska stanica [25]

Robotska stanica se sastoji od robota OTC Almega AX V6 sa 6 stupnjeva slobode gibanja, a sa pozicionerom P250V ROBO sustav dobiva dodatni stupanje slobode gibanja (rotaciju). Sinkronizaciju složenih gibanja robota, pozicionera, konstantnu brzinu zavarivanja i nagib pištolja osigurava Sychromotion funkcija. Sustav se sastoji dva izvora struje za zavarivanje MIG/MAG VPS 4000 i TIG VARTIG 3500 DC/AC. Oba izvora struje su vodom hlađene inventerske jedinice s mogućnošću impulsnog zavarivanja. Izmjena pištolja za MIG/MAG odnosno TIG zavarivanje vrši se automatski, što znači da se jedan radni komad može zavarivati sa dva postupka zavarivanja na istoj robotskoj stanici. Čišćenje sapnice MIG/MAG pištolja za zavarivanje vrši se na ugrađenom alatu, a osim čišćenja alata automatski krati žicu i nanosi sredstvo protiv naljepljivanja kapljica. Praćenje spoja pri zavarivanju vrši se senzorom za električni luk (poglavlje 3.5.3) koji prati oscilacije napona i time mijenja putanju pištolja. Sprečavanje kolizije glave za zavarivanje s radnim komadom ili nečim sličnim vrši se takozvanim „shock“ senzorom. Programiranje se vrši sa privjeskom za učenje, takav način programiranja naziva se on-line. Programski paket kompatibilan je sa Windows operativnim sustavima što olakšava pohranjivanje podataka i povezivanje u mrežne sustave. Svako podešavanje parametara za zavarivanje vrši se pomoću privjeska za učenja i bilo kakvo podešavanje na izvorima struje za zavarivanje nije potrebno [25].

4.1.1. Robot Almega AX-V6

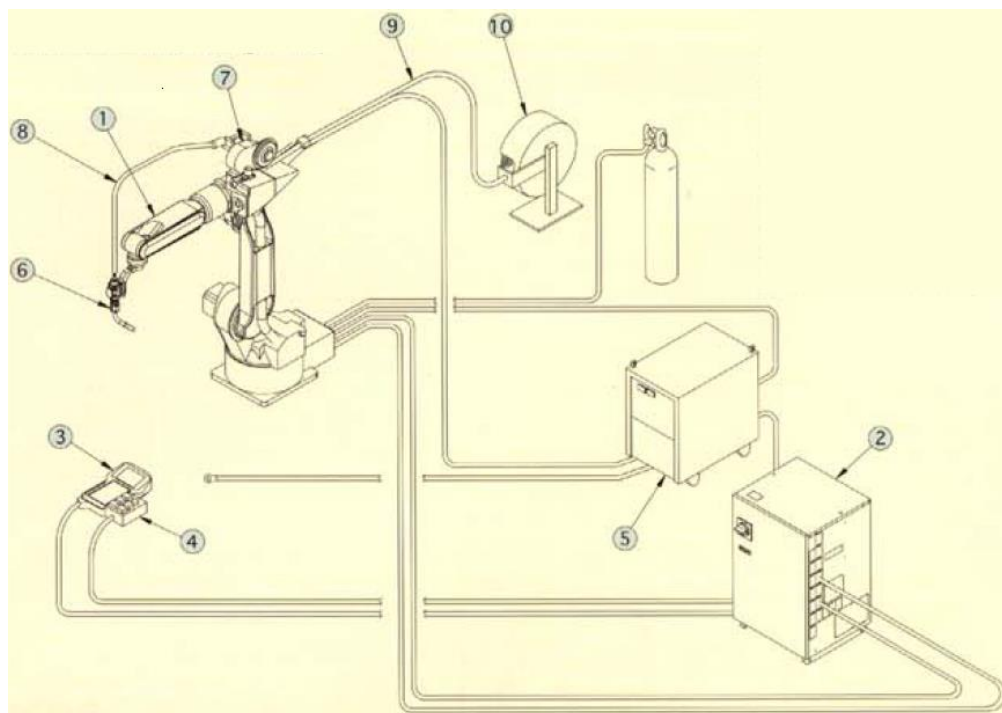
Struktura robota Almega AX-V6 određena je sa 6 stupnjeva slobode gibanja od kojih su svi rotacijski (6 SSG). Kinematička struktura s rotacijskim slobodama gibanja omogućuju lakše pozicioniranje robota i orijentaciju pištolja za zavarivanje. Takvom strukturom lakše je pratiti dodatni pozicioner i njegovo gibanje. Radni prostor robota prikazan je na slici 4.2.



Slika 4.2. Radni prostor robota [26]

Glavni dijelovi robotske stanice prikazani su na slici 4.3.:

1. manipulator,
2. upravljačka jedinica,
3. privjesak za učenje,
4. operacijska kutija,
5. izvor za zavarivanje,
6. pištolj za zavarivanje,
7. dodavač žice,
8. polikabel,
9. kablovi,
10. kolut dodatnog materijala.



Slika 4.3. Osnovni dijelovi robotske stsnice [26]

Tehničke karakteristike robota AX-V6 prikazane su u tablici 4.1.

Tablica 4.1. Tehničke karakteristike Robota AX-V6 [26]

Tip			AX-V6
Struktura			Vertikalna artikuliranost
Broj osi			6
Maksimalna nosivost			6 kg
Ponovljivost			±0,08 mm
Pogonski sistem			AC servo motor
Snaga pogona			2600 W
Koder pobžaja			Absolutni koder
Radno područje	Ruka	Okretanje1.os	±170° (bočna montaža ±50°)
		Nagib – 2 os	-155° ~ +90°
		Okretanje3.os	-170° ~ +190°
	Zglob	Okretanje 4.os	±180°
		Nagib – 5 os	-50° ~ +230°
		Okretanje6.os	±360°
Maksimalna hbrzina	Ruka	Okretanje1.os	210°/s (190°/s)
		Nagib – 2 os	210°/s
		Okretanje3.os	210°/s
	Zglob	Okretanje 4.os	420°/s
		Nagib – 5 os	420°/s
		Okretanje 6.os	620°/s
Dopušteno opterećenje na zglobovima	Dopušte ni moment	Okretanje4.os	11,8 Nm
		Nagib – 5 os	9,8 Nm
		Okretanje6.os	5,9 Nm
	Dopušte ni okretni moment	Okretanje4.os	0,30 kgm²
		Nagib – 5 os	0,25 kgm²
		Okretanje6.os	0,06 kgm²
Radno područje			3,14m² x 340°
Temperatura okoline i relativna vlažnost			0~45°C, 20~80%RH (nekondenzirana)
Masa			160 kg
Dodatna nosivost 3. osi			10 kg
Pozicija montaže			Stojeća, viseća , bočna
Boja			Ruke: bijela, nosivi del: plava

4.1.2. Izvori struje

Izvor struje za MIG/MAG zavarivanje prikazan je na slici 4.4. a). VPS 4000 digit omogućuje tri postupka zavarivanja MIG/MAG klasični, MIG/MAG impulsni i zavarivanje obloženom elektrodom. Tehnički podaci ovoga izvora struje dani su u tablici 4.2.



Slika 4.4. Izvori za zavarivanje [26]

Tablica 4.2. Tehnički podaci VPS 4000 digit izvora za zavarivanje [26]

Priključni napon, V, Hz	3 faze 400, 50
Raspon struje zavarivanja, A	30-400
Napon zavarivanja, V	15,5-34
Intermitencija 50%, A	400
Intermitencija 100%, A	283
Promjer žice za zavarivanje, mm	0,8-1,2
Dimenzije DxŠxV, mm	653x300x595
Masa, kg	45

Izvor struje za TIG zavarivanje osim TIG postupka zavarivanja nudi i ručno elektrolučno zavarivanje obloženom elektrodom. Tehničke karakteristike Vartig 3500 digit AC/DC uređaja prikazane su u tablici 4.3.

Tablica 4.3. Tehnički podaci Vartig 3500 digit AC/DC izvora za zavarivanje [26]

TIP	Vartig 3500 digit AC/DC (G i W)
Priključni napon:	3 x 400 V, 50 – 60 Hz
Osigurač (spori):	20 A
Područje zavarivanja TIG:	4 – 300 A (DC)
Područje zavarivanja REL:	10 – 250 A
Intermitencija TIG:	40% - 300 A (DC) 60% - 245 (DC) 100% - 190 A (AC)
Intermitencija REL:	/
Napon zavarivanja REL/TIG:	21–30,5V / 10,2–22V
Promjer elektrode:	Ø 1,5 – 5,0 mm
Hlađenje izvora:	prisilno - ventilator
Masa:	35g
Dimenzije (mm):	610 x 485 x 280

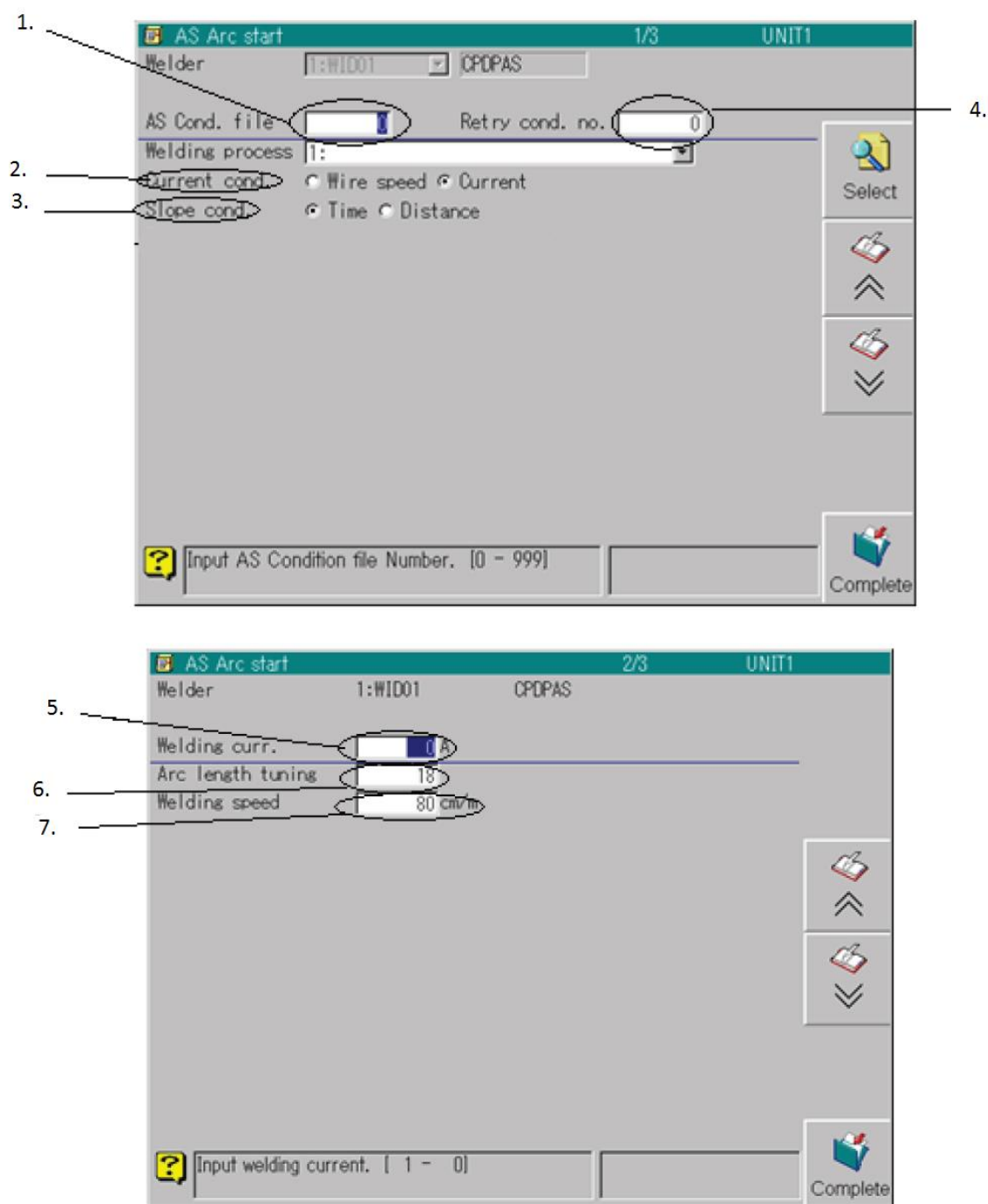
G - pištolj hlađen zrakom; W - pištolj hlađen vodom

4.2. Izrada programa za njihanje

Kao što je spomenuto svi parametri za zavarivanje podešavaju se pomoću privjeska za učenje. Parametri zavarivanja podešavaju se u dva prozora, u jednom je moguće podesiti funkcije njihanja pištolja, a u drugom ostale parametre kao što je struja zavarivanja, brzina zavarivanja, napon (slika 4.5.)...

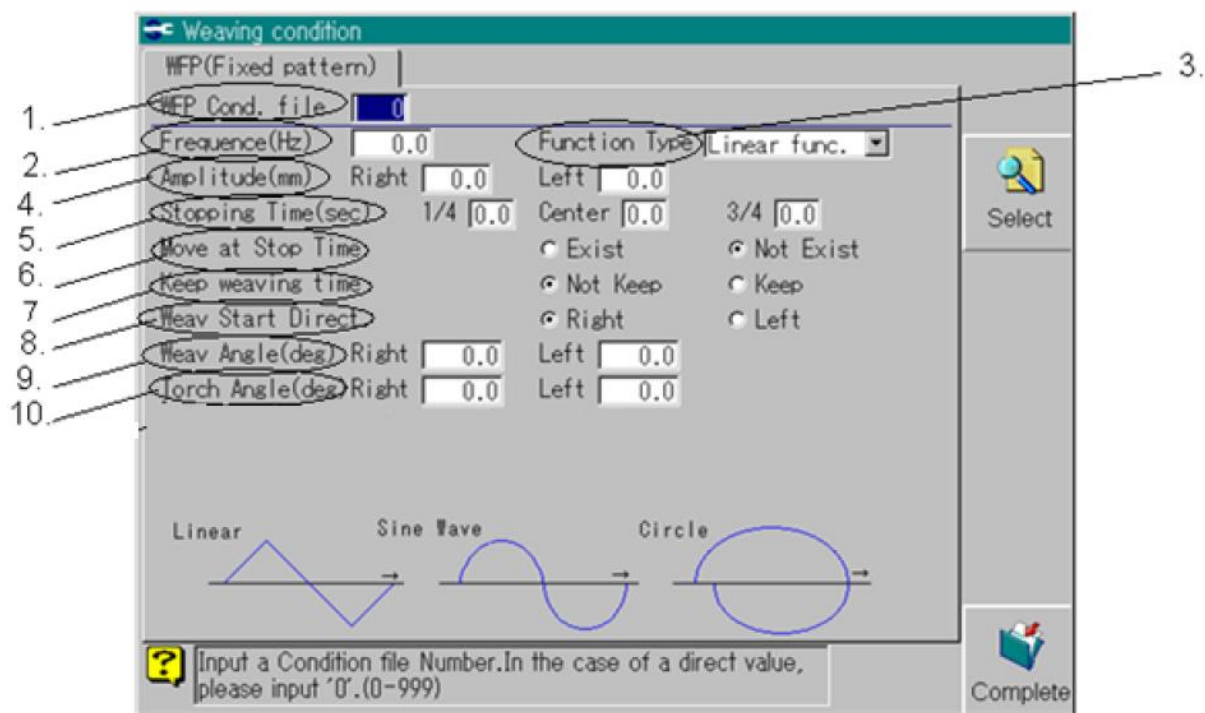
Brojčane oznake na slici 4.5.:

1. Odabir postojeće ili kreiranje nove datoteke s parametrima zavarivanja. Nova datoteka ne smije imati broj postojeće datoteke
2. Ova funkcija određuje da li će se jačina struje iskazivati u amperima ili prema brzini dodavanja žice.
3. Ovom funkcijom određuje se kako će se vršiti provođenje kontrole nagiba od početka uspostave električnog luka, za vrijeme mirovanja robota (glavna funkcija vrijeme) ili za vrijeme gibanja robota (glavna funkcija udaljenost).
4. Izbor datoteke za uspostavu električnog luka. Ako je odabrana 0 tada se električni luk uspostavlja na standardni način.
5. Ovisno na koji način se određuje struja zavarivanja (amperi, brzina dodavanja žica), ova funkcija omogućuje podešavanje jedne odnosno druge vrijednosti (struja se upisuje u A, a brzina dodavanja žice u cm/min).
6. Ovo polje određuje visinu električnog luka, odnosno što je visina veća veći je i napon električnog luka.
7. Ovo polje određuje brzinu zavarivanja u cm/min.



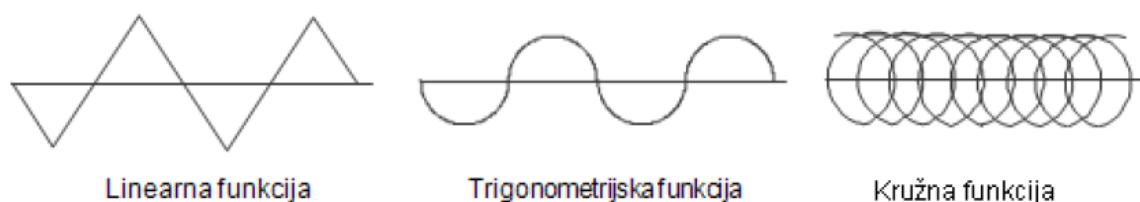
Slika 4.5. Prozori u kojima se definiraju parametri zavarivanja

U sljedećem prozoru određuju se parametri njihanja pištolja. Njihanje se uspostavlja jedino ako se na glavnom prozoru uključi opcija njihanja. Slika 4.6. prikazuje parametre koji se podešavaju kod tehnike njihanja.



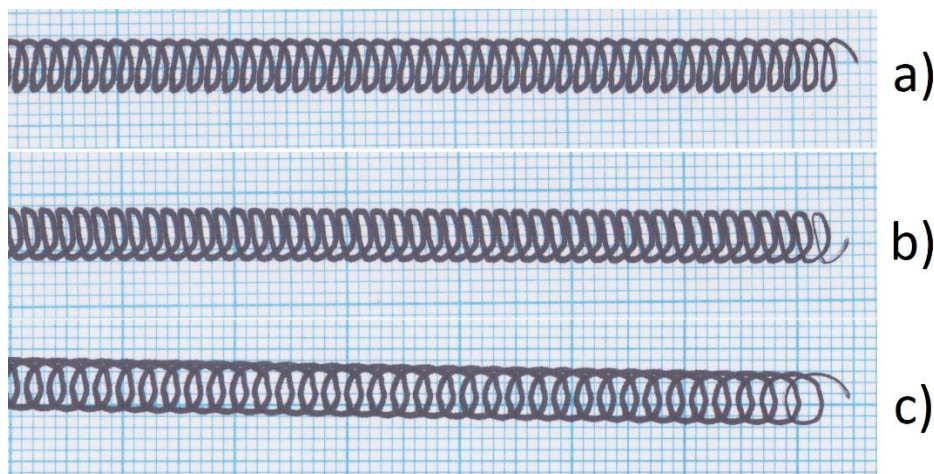
Slika 4.6. Prozor u kojem se definiraju parametri njihanja

1. Odabir ili kreiranje nove datoteke s parametrima njihanja.
2. Frekvencija određuje koliko će se puta u jednoj sekundi izvesti jedan period njihanja.
3. Oblik funkcije njihanja. Ovom funkcijom odabire se jedan od tri moguće funkcije njihanja (slika 4.7.)



Slika 4.7. Funkcije njihanja koje posjeduje AX – V6 robot

Odabirom jedne od funkcija mijenja se prozor i omogućuje definiranje drugačijih parametara. Kod odabira kružnog načina njihanja, moguće je određivati postotak koji definira koliki dio radijusa će pištolj proći za prednji odnosno stražnji radijus. Na slici 4.8. prikazani su oblici krivulje koju robot radi tijekom promjene postotaka. Slika 4.9. prikazuje shematski kako se mijenja oblik krivulje u odnosu na promjenu postotka prednjeg/stražnjeg radijusa.

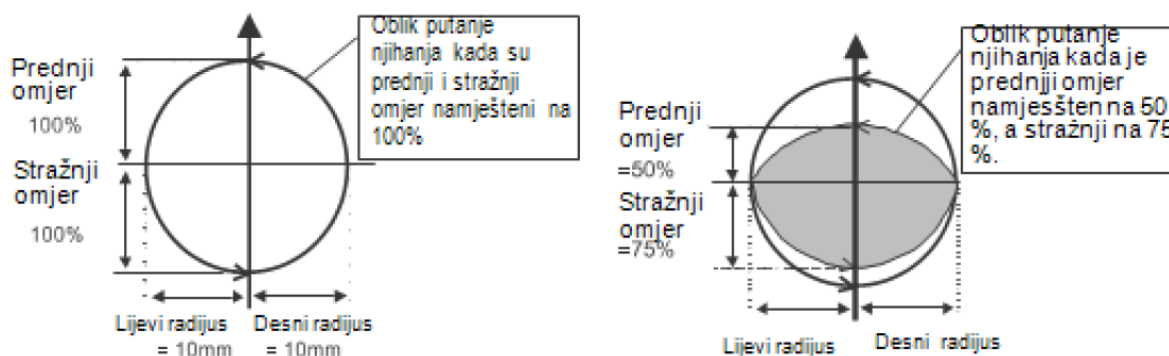


Slika 4.8. Oblika njihanja pištolja ovisno o postotku i smjeru kretanja

a) kretanje s lijeve strane, postotak 10/75

b) kretanje s desne strane, postotak 10/75

c) kretanje s desne strane, postotak 100/100



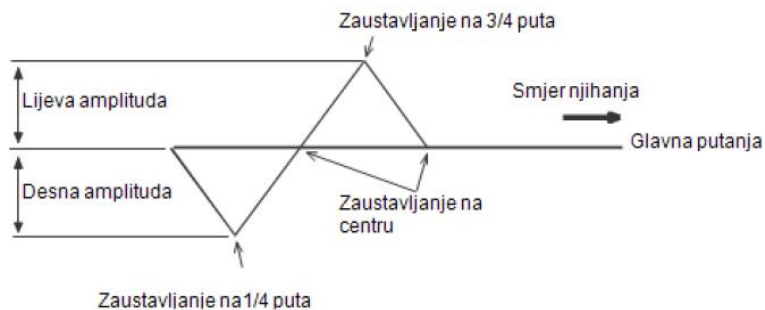
Slika 4.9. Prikaz promjene radijusa kružnice u odnosu na postotak

4. Amplituda određuje širinu koju pištolj prijeđe tijekom jednog njihanja. Kod sinusnog i linearnog načina njihanja moguće je neovisno mijenjati lijevu i desnu amplitudu. Kod kružnog oblika njihanja umjesto amplitude definira se radijus. Moguće je mijenjati dimenziju lijevog i desnog radijusa. Slika 4.10. prikazuje amplitude pri kružnoj te linearnoj i trigonometrijskoj funkciji.



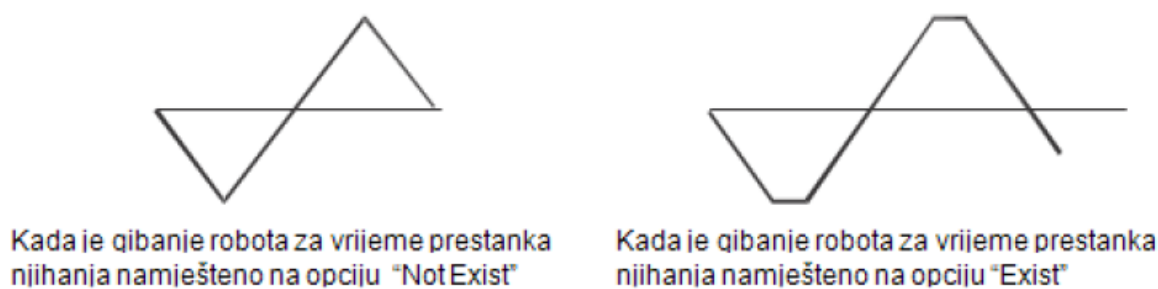
Slika 4. 10. Definiranje amplitude pri linearnoj i trigonometrijskoj te kružnoj funkciji

5. Vrijeme zadržavanja predstavlja vrijeme pri kojem se pištolj ne giba po definiranoj krivulji njihanja. To znači da se pištolj zaustavlja u jednoj ili više od tri moguće točke zaustavljanja (lijevi i desni rub, te sredina). Slika 4.11. prikazuje mjesta zaustavljanja pištolja.



Slika 4.11. Točke zaustavljanja pištolja

6. Gibanje u zaustavnoj točki određuje da li se robot nastavlja gibati u smjeru zavarivanja ili se zaustavlja za vrijeme zadržavanja (vrijeme zadržavanja prekida njihanje pištolja za zavarivanje). Slika 4.12. prikazuje putanju ss uključenom i isključenom ovom postavkom.

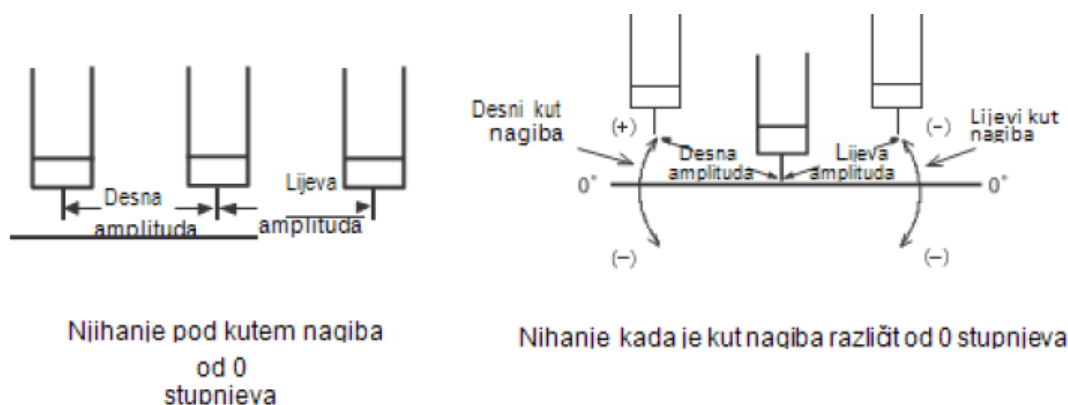


Slika 4.12. Gibanje u zaustavnoj točki

7. Nastavak njihanja koristi se kako nikako ne bi došlo do prestanka njihanja pištolja čak i onda kada je postavka namješšana da njihanje prestane. Ova postavka nema funkciju ako postavka prestanka njihanja nije uključena.

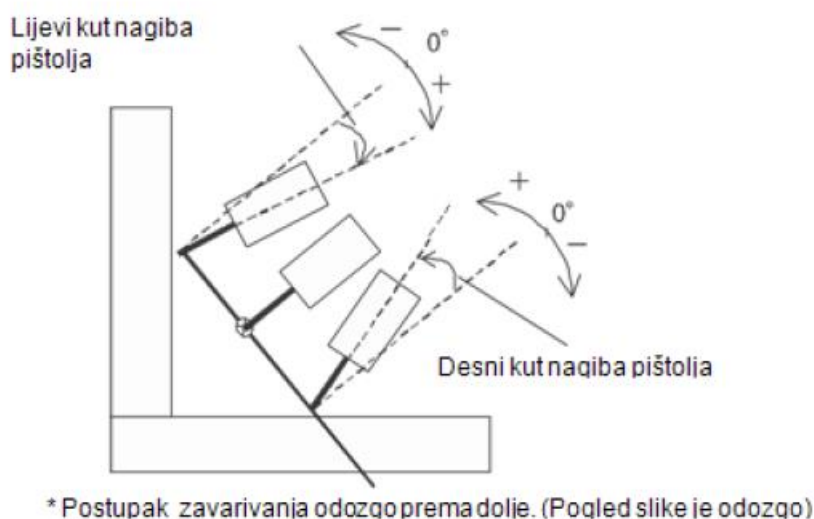
8. Odabir strane za početak njihanja određuje početak njihanja odnosno dali će ono početi s lijeve ili desne strane s obzirom na smjer gibanja. Slika 4.8. a) i b) pokazuju razliku u obrascu njihanja promjenom smjera početka njihanja.

9. Kut njihanja određuje kut njihanja pištolja za zavarivanje u odnosu na radni komad i smjer gibanja. Moguće je namjestiti različite vrijednosti za lijevu i desnu stranu. Slika 4.13. prikazuje kut njihanja.



Slika 4.13. Kut nihanja

10. Zadnja postavka nagib pištolja omogućuje određivanje kuta pištolja u odnosu na radni komad i neutralni položaj pištolja za zavarivanje (slika 4.14.).

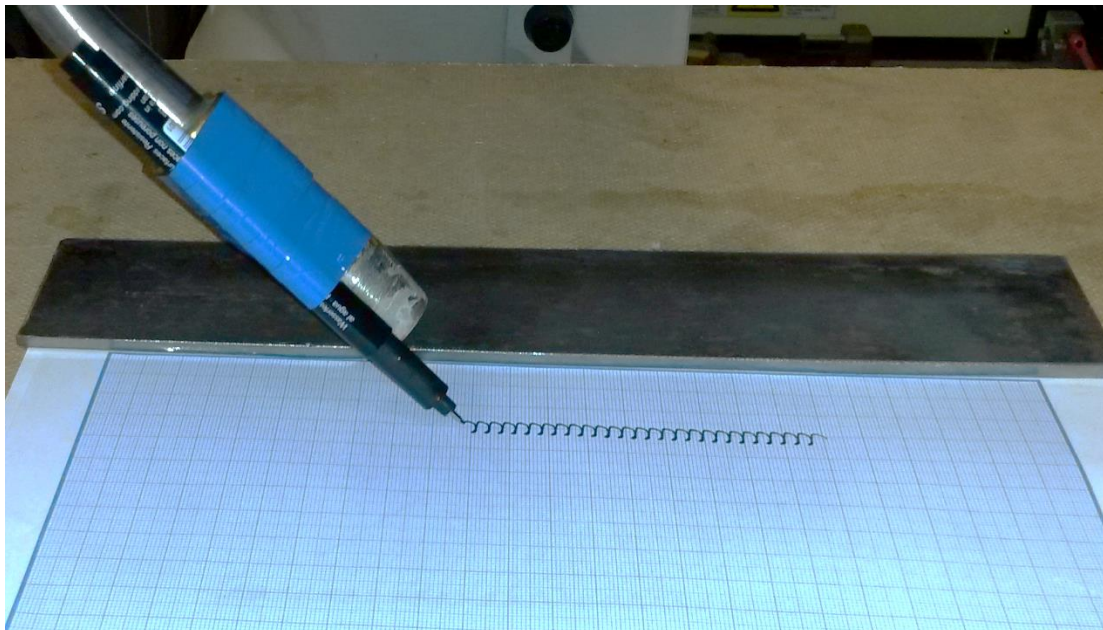


Slika 4.14. Nagib pištolja

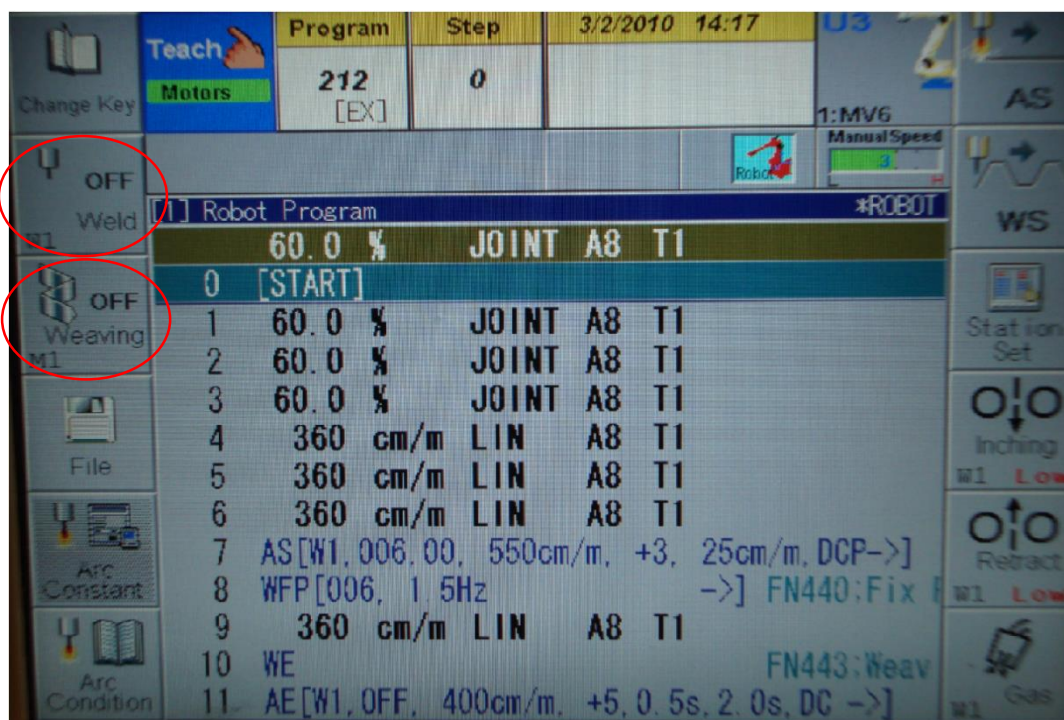
4.3. Analiza krivulje nihanja pri zavarivanju korijenskog prolaza

U ovome dijelu rada analizirana je tehnika nihanja korijenskog prolaza. Kako bi se dobila potrebna analiza tehnike nihanja zavaren je korijenski prolaz s različitim parametrima nihanja, te je kasnije snimljena krivulja nihanja. Snimanje tehnike nihanja izvedeno je pomoću flomastera koji se pomoću ljepljive trake pozicionirao na vrh pištolja za zavarivanje (slika 4.15.). Krivulja nihanja zapisivana je na milimetarskom papiru. Tijekom pozicioniranja pisala na vrh pištolja, bilo je potrebno paziti da pištolj kada dođe u radnu točku ne stvara preveliki odnosno premali pritisak flomastera na milimetarski papir. Tijekom puštanja robota u rad potrebno je da robot prati stvarnu putanju zavarivanja, a da pri tome ne uključi električni luk odnosno da ne počne zavarivanje. Taj način rada dobiva se namještanjem postavki na privjesku za učenje. Opcija koju je potrebno

podesiti prikazana je na slici 4.16., oznaka „weld“ mora biti isključena „off“, a oznaka „weaving“ mora biti uključena kako bi robot radio gibanje njihanja.



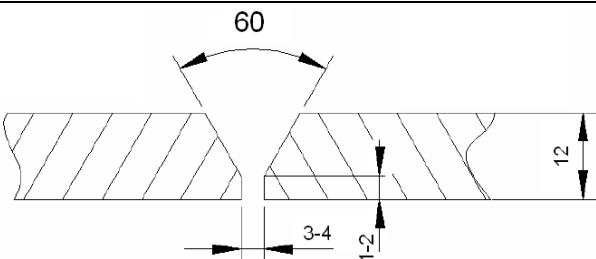
Slika 4.15. Izgled pisala montiranog na vrh pištolja za zavarivanje



Slika 4.16. Izgled osnovnog prozora privjeska za učenje

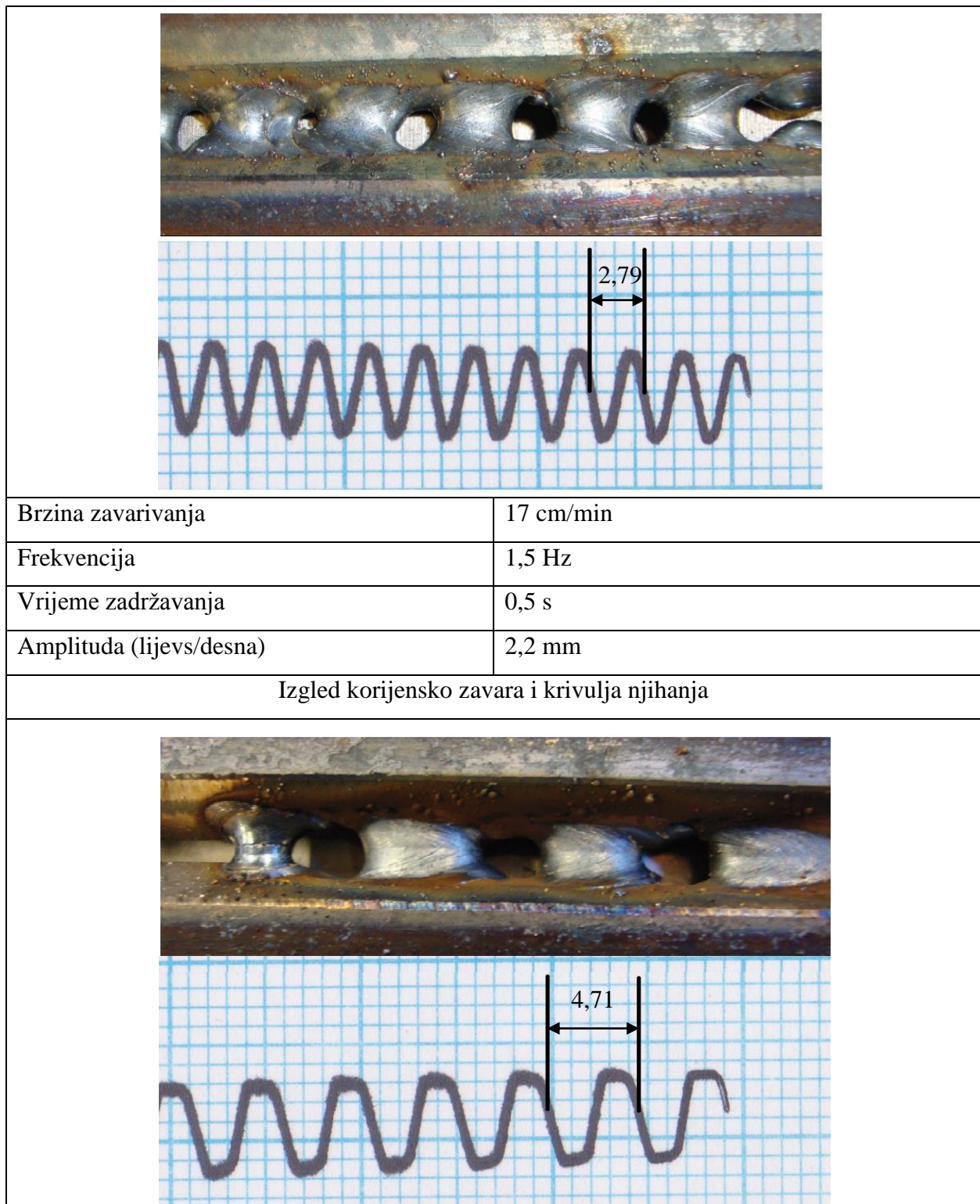
Parametri zavarivanja i priprema spoja prikazani su u tablici 4.4. (navedeni parametri u tablici 4.4. jednaki su za oba zavarena spoja). U tablici 4.5. prikazani su parametri njihanja i izgled korijenskog prolaza i krivulje njihanja linearne tehnike. Zavarivanje je izvedeno prijenosom metala kratkim spojevima u položenom horizontalnom položaju (PA).

Tablica 4.4. Parametri zavarivanja

Parametri zavarivanja	
Osnovni materijal, debljina	S 235, 12 mm
Dodatni materijal	G 42 4 C/M G39,1
Vrsta plina	Feromix (82% Ar, 18% CO ₂)
Protok plina	16 l/min
Napon	19 V
Struja	125 A
Brzina žice	300 cm/min
Priprema spoja	
	

Tablica 4.5. Parametri njihanja i izgled korijenskog prolaza i krivulje njihanja linearne tehnike

Brzina zavarivanja	15 cm/min
Frekvencija	1,5 Hz
Vrijeme zadržavanja	0,2 s
Amplituda (lijevs/desna)	2,2 mm
Izgled korijenskog zavora i krivulja njihanja	

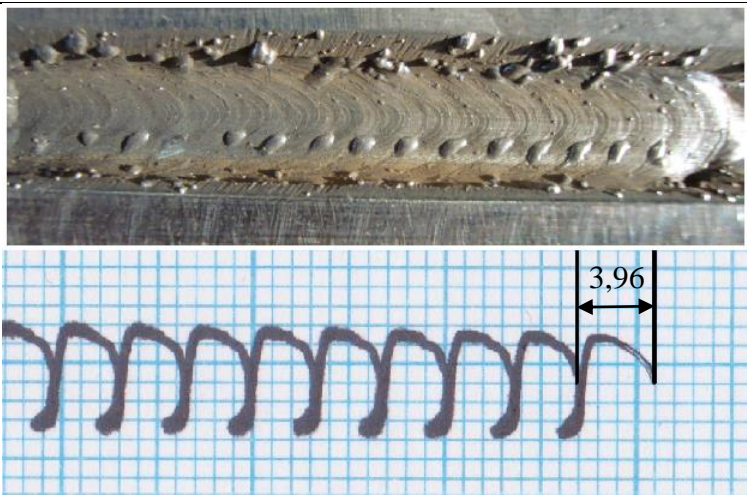


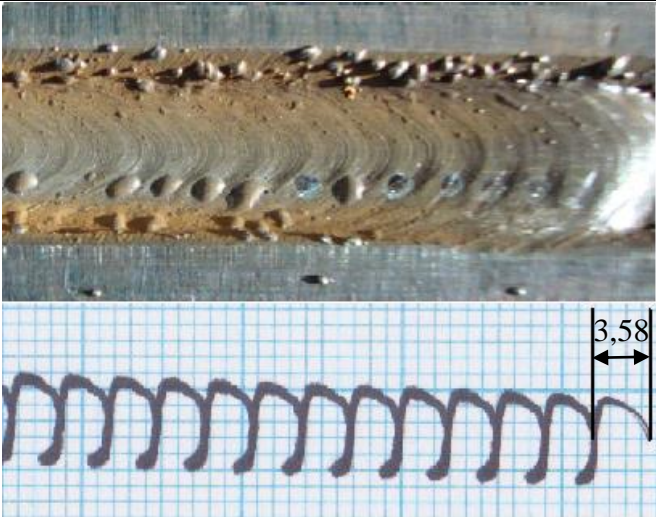
U tablici 4.5. prikazani su parametri njihanja i izgled korijenskih prolaza zavarivanih linearnom tehnikom njihanja. Iz priloženoga se vidi da ovi korijenski zavari nikako nisu zadovoljavajući. Vidi se nepotpunost korijenja, nema kontinuiranog zavara. Nadalje, krivulje njihanja nisu iste već ih razlikuje širina perioda. Razlika je 1,92 mm, a razlog te razlike u duljini je povećana brzina zavarivanja i vrijeme zadržavanja. Smanjenjem vremena zadržavanja pištolja na rubovima krivulje

njihanja dobiva se manja protaljenost rubova spoja, što je kod korijenskog prolaza povoljno kako bi više taline došlo do sredine spoja. Prvi korijenski prolaz u odnosu na drugi ima veću popunu korijena zbog manjeg vremena zadržavanja i manje brzine zavarivanja (kod veće brzine zavarivanja, pištolj prelazi veći put na točki zadržavanja). Iz priloženog se zaključuje da linearna tehnika njihanja nije prigodna za zavarivanje korijenskih prolaza, kao što je i spomenuto u poglavlju 2.1.5.

U tablici 4.6. prikazani su parametri njihanja i izgled korijenskih prolaza, te izgled krivulje kružne tehnike njihanja. Za razliku od linearne tehnike njihanja kružnom tehnikom dobiven je prihvatljiv korijenski prolaz. Razlog dobivanja potpune popune korijena je kružna tehnika njihanja pištolja koja omogućuje stvaranje dovoljno taline i popunu raspora jer se pištolj zbog tehnike njihanja u kružnom pokretu vraća natrag i popunjava već nastalu talinu dodatnim materijalom. Iz krivulje njihanja vidljivo je da pištolj prilikom rada druge (manje amplitude) prolazi već prođenom putanjom i na taj način osigurava dovoljno taline u korijenu. Usporedbom dviju krivulja vidljivo je da period prve krivulje ima veću širinu za 0,38 mm. Razlog ovoj maloj razlici je promjena brzine zavarivanja za samo 2 cm/min.

Tablica 4.6. Parametri njihanja i izgled korijenskog prolaza i krivulje njihanja kružne tehnike

Brzina zavarivanja	16 cm/min
Frekvencija	2 Hz
Vrijeme zadržavanja	0,4 s
Amplituda (lijevs/desna)	2,5 mm
Šablona kružnog njihanja	10/75 %
Izgled korijensko zavara i krivulja njihanja	
	
Brzina zavarivanja	14 cm/min
Frekvencija	2 Hz

Vrijeme zadržavanja	0,4 s
Amplituda (lijevs/desna)	2,5 mm
Šablona kružnog njihanja	10/75 %
Izgled korijensko zavara i krivulja njihanja	
	

4.4. Analiza snimljenih krivulja njihanja

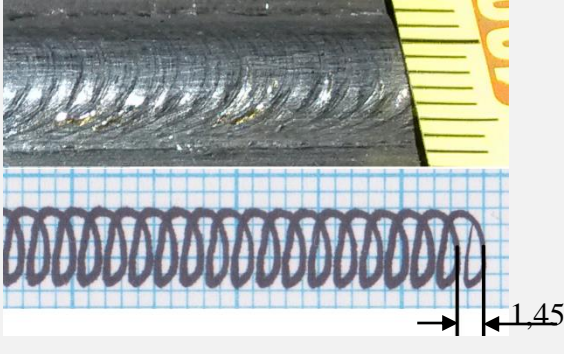
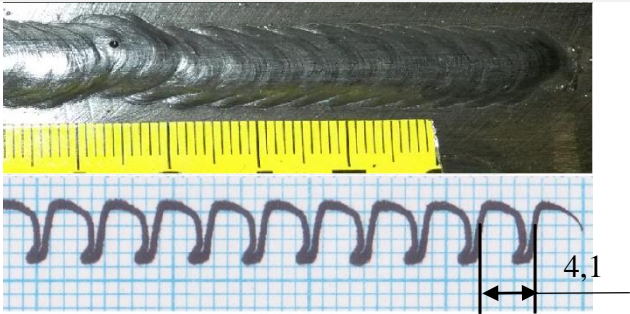
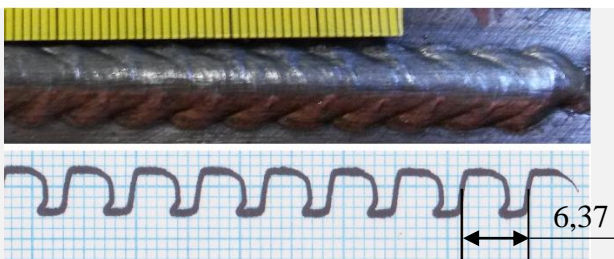
U poglavlju prikazani su navari zavareni različitim tehnikama njihanja i vremenima zadržavanja. Snimljene su krivulje tehnike njihanja i analizirana je ovisnost duljine perioda o vremenu zadržavanja. Dobiveni rezultati su komentirani i prikazani u grafički u dijagramu. Tablica 4.7. prikazuje parametre zavarivanja za kružnu tehniku njihanja. Kod tri navara zavarenih kružnom tehnikom njihanja mijenja se samo vrijeme zadržavanja.

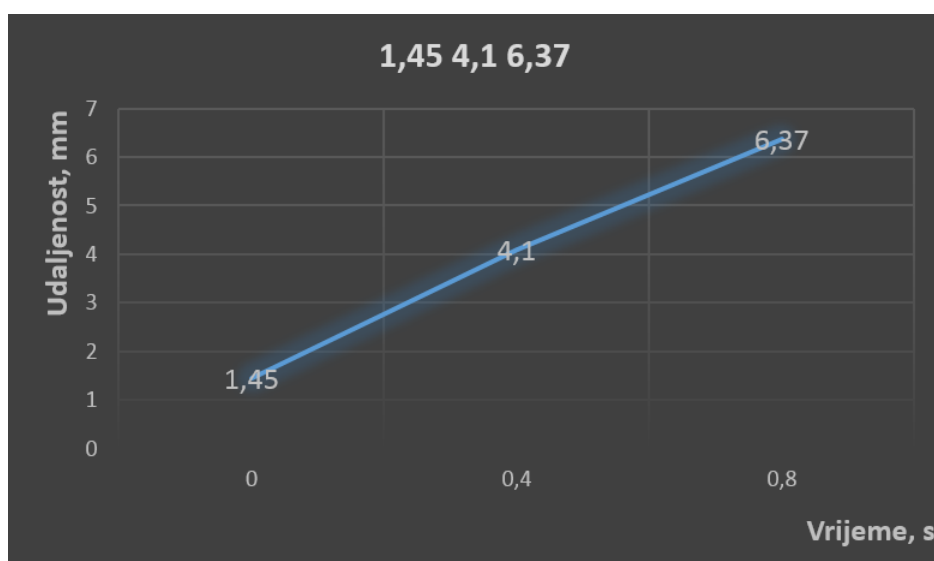
Tablica 4.7. Parametri zavarivanja za navare zavarene kružnom tehnikom njihanja

PARAMETRI ZAVARIVANJA

OSNOVNI MATERIJAL, DEBLJINA	S 235, 12 mm
DODATNI MATERIJAL	G 42 4 C/M G39,1
VRSTA PLINA	Feromix (82% Ar, 18% CO ₂)
PROTOK PLINA	16 l/min
NAPON	19 V
STRUJA	125 A
BRZINA ŽICE	300 cm/min
BRZINA ZAVARIVANJA	18 cm/min
FREKVENCIJA	2 Hz
AMPLITUDA LIJEVA/DESNA	2,5 mm
ŠABLONA NJIHANJA	10/75 %

Tablica 4.8. Izgled navara i krivulje kružne tehnike njihanja

Vrijeme zadržavanja, s	Period, mm	
0	1,45	
0,4	4,1	
0,8	6,37	



Slika 4.17. Dijagramski prikaz ovisnosti širine perioda krivulje i vremena zadržavanja

Analizom dobivenih rezultata vidljivo je da se promjenom vremena zadržavanja na rubnim dijelovima krivulje njihanja mijenja i period njihanja. Povećanjem vremena zadržavanja povećava se i period krivulje njihanja. Takvi rezultati su bili očekivani. Na slici 4.17. dijagramski je pokazana ovisnost širine periode u mm i vrijeme zadržavanja u sekundama. Da se zaključiti da se promjena ponaša linearno, iako postoji malo odstupanje (netočnost mjerenja). Navari su prikazani u tablici 4.8. Analizom ponašanja taline zaključuje se da se njena geometrija mijenja promjenom parametra njihanja, u ovom slučaju vremena zadržavanja. Vizualno prihvatljivi navar je onaj čije vrijeme zadržavanja iznosi 0,4 sekunde. Navar zavaren bez zadržavanja previše je ispupčen i jasno je da rubovi gusjenice zbog nedovoljnog vremena zadržavanja nisu adekvatno protaljeni. Zadnji navar zavaren s zadržavanjem od 0,8 sekundi također nije prihvatljiv. Problem ovakvog navara je pojava šupljina između svakog perioda njihanja, što daje za zaključak da taj dio navara nije dovoljno protaljen.

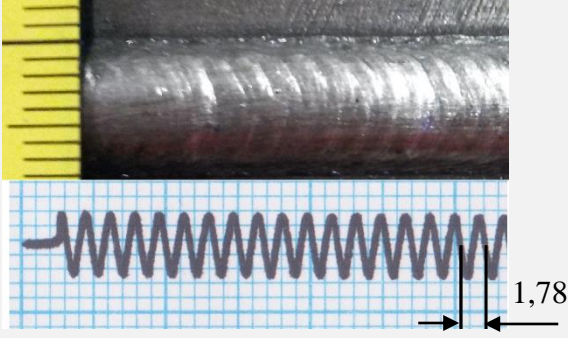
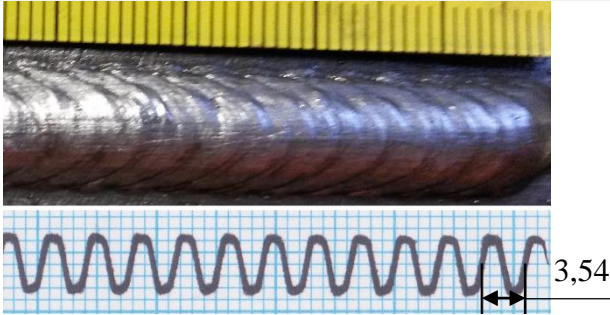
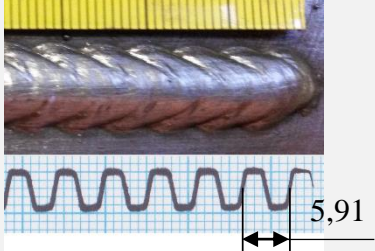
Tablica 4.9. prikazuje parametre navarivanja linearnom tehnikom njihanja. Tri navara navarena sa linearnom tehnikom njihanja imaju različita vremena zadržavanja.

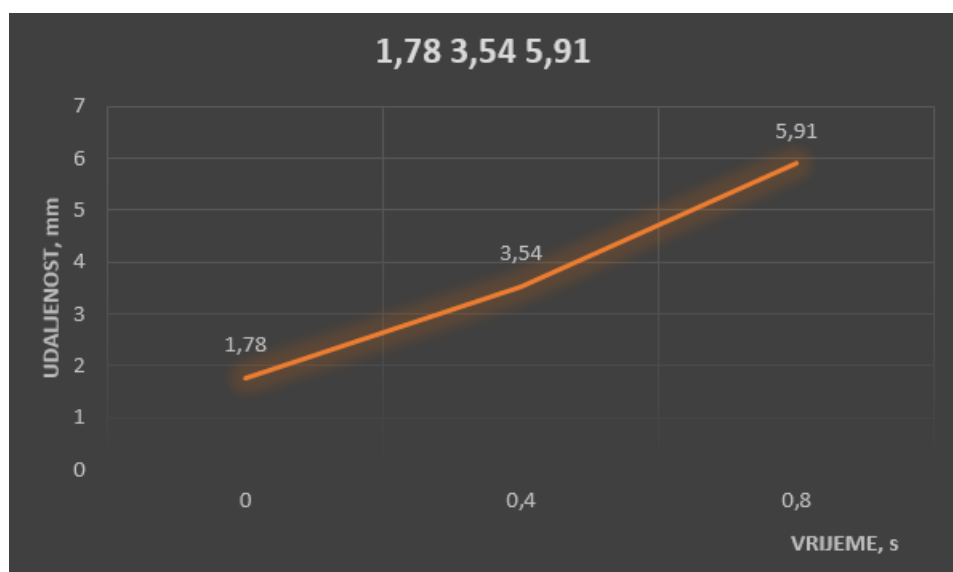
Tablica 4.9. Parametri za navarivanje navareni linearnom tehnikom njihanja

PARAMETRI ZAVARIVANJA

OSNOVNI MATERIJAL, DEBLJINA	S 235, 12 mm
DODATNI MATERIJAL	G 42 4 C/M G39,1
VRSTA PLINA	Feromix (82% Ar, 18% CO ₂)
PROTOK PLINA	16 l/min
NAPON	19 V
STRUJA	125 A
BRZINA ŽICE	300 cm/min
BRZINA ZAVARIVANJA	17 cm/min
FREKVENCIJA	1,5 Hz
AMPLITUDA LIJEVA/DESNA	2,2 mm

Tablica 4.10.

Vrijeme zadržavanja, s	Period, mm	
0	1,78	
0,4	3,54	
0,8	5,91	



Slika 4.18. Dijagramski prikaz ovisnosti širine perioda i vremena zadržavanja

Kao i kod kružne tehnike njihanja i kod linearne tehnike njihanja povećavanjem vremena zadržavanja povećava se širina perioda krivulje njihanja. Analizom širine perioda vidljivo je iz slike 4.18. da se promjena ponaša linearno (zbog netočnosti mjerenja moguća su mala odstupanja; u pitanju su desetinke milimetara). Jedan navar prolazi vizualnu kontrolu, navar navarivan sa zadržavanjem od 0,4 sekunde. Ponašanje taline kod linearnog načina njihanja vrlo je slično ponašanju taline kod kružne tehnike njihanja. Vremena zadržavanja su ista tako da je i protaljivanje na rubovima navara isto. Razlozi neprihvatljivosti druga dva navara isti su kao i kod kružne tehnike njihanja. Bez zadržavanja ne dolazi do dovoljnog protaljivanja krajeva navara, a veće vrijeme zadržavanja uzrokuje nošenje taline previše u naprijed, te oz tog razloga nastaje dio koji nije dobro protaljen i popunjen dodatnim materijalom. Valja naglasiti da izgled navara nikako nije isti kao i zavareni spoj kod korijenskog zavarivanja. Zbog korijenske pripreme talina bi se dodatno zadržavala na rubovima i zavareni spoj bi bio širi.

5. ZAKLJUČAK

Robotizacija zavarivanja raste svakim danom. Razvitak robotike i tehnologije zavarivanja dovodi do stalne potrebe za mijenjanje dobivenih parametara za zavarivanje. Mukotrpan rad inženjera i znanstvenika na području ovih dviju znanosti dovest će do rješavanja problema i poboljšanja tehnologije zavarivanja.

Prvi dio rada obrađuje robote za zavarivanje, posebna pozornost posvećena je tehnikama programiranja i senzorima koji se koriste kod MIG/MAG zavarivanja. Također su obrađeni i parametri zavarivanja kod MIG/MAG postupka, ponajviše tehnika njihanja.

U eksperimentalnom dijelu rada na robotskoj stanici u Laboratoriju za zavarivanje provedeno je zavarivanje korijena i navarivanje raznim tehnikama njihanja u cilju dobivanja podataka o upotrebljivosti istih.

Eksperimentalno dobiveni podaci potvrđuju naputke literature. Konkretno linearna tehnika njihanja nije primjenjiva za korijensko zavarivanje, dok je kružna tehnika zavarivanja dala prihvatljivi korijenski prolaz. Daljnjom analizom obrazaca njihanja zaključuje se da vrijeme zadržavanja na krajevima amplituda određuje izgled zavarenog spoja (navarenog), protaljenost rubova i popunu zavora talinom. Preveliko vrijeme zadržavanja uzrokuje nepotpuno popunjavanje sredine zavarenog spoja što dovodi do mogućnosti pogrešaka u spoju. Zavarivanje bez zadržavanja ne dovodi do dovoljne protaljenosti rubova zavarenog spoja, odnosno uzrokuje nastanak naljepljivanja.

LITERATURA

- [1] Barra, S. R.: *Site de Soldagem*, 2003., <http://www.sitedasoldagem.com.br/conceito%20basico/>, 18.2.2015.
- [2] *Gas Metal Arc Welding Product and Procedure Selection*, The Lincoln Electric Company, USA, 2014.
- [3] Garašić, I.: *MIG/MAG-elektrolučno zavarivanje taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog/aktivnog plina*, Autorizirana predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [4] Piers, J., N.; Loureiro A.; Böllmsjö, G.: *Welding Robots Technology, System Issues and Applications*, Springer, London, 2006.
- [5] *Shielding Gases Selection Manual*, Praxair, Praxair Technology, 1998.
- [6] *Gas Metal Arc Welding Guidelines*, Lincoln Electric The Welding Experts, USA, 2006.
- [7] *Basic Welding Techniques Explained*, WcWelding.com, <http://www.wcwelding.com/welding-techniques.html>, 8. 11. 2015.
- [8] *Welder Guide Book*, ESAB, <http://southeasteurope.esab.com/southeasteurope/en/index.cfm>, 8. 11. 2015.
- [9] DIN EN ISO 6947
- [10] Sutera, M.; *Fundamentals of Professional Welding*, 2011. <http://manikamsutera.blogspot.hr/2011/08/fundamentals-of-professional-welding.html>, 8.11.2015.
- [11] Zhang, Y. M.: *Real-time weld process monitoring*, Woodhead Publishing Limited, USA, 2008.
- [12] Piers, J., N.; Loureiro A.; Böllmsjö, G.: *Welding Robots Technology, System Issues and Applications*, Springer, London, 2006.
- [13], *IFR statistical department*, World Robotics, <http://www.worldrobotics.org/index.php?id=home>, 20.4.2015.
- [14] Siciliano, B.; Khatib, O.: *Springer Handbook of Robotics*, Springer, USA, 2008.
- [15] Jorge, A.; Park, F. C.: *Performance Evaluation and Design Criteria*, Springer Handbook of Robotics, USA, 2008.
- [16] Vijaykumar, R.; Waldron, K. J.; Tsai, M. J.: *Geometric optimization of serial chain manipulator structures for working volume and dexterity*, Robots and Screw Theory, Oxford, 2004.

- [17] Crneković, M.: *Robotika*, Autorizirana predavanja, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2015.
- [18] Barra, S. R.: *Site de Soldagem*, 2003., <http://www.sitedasoldagem.com.br/conceito%20basico/>, 18.2.2015.
- [19] Almaga AX series, Instruction manual, "Basic operations", OTC DAIHEN EUROPE GmbH., Krefelder Strasse 675-677, D-41066 Monchengladbach
- [20] *Robot programming systems comparison*, CMA Robotics, <http://www.cmarobot.it/> 8. 11. 2015.
- [21] Dilthey, U.: *Welding Technology I Welding and Cutting Technologies*, Ignatios Staboulis, Germany, 2013.
- [22] *Robotic Arc Welding Manual*, Motoman, USA, 2004.
- [23] Rivas, M.; Flores, W.; Rivera, J.; Sergiyenko, O.: *A Method and Electronic Device to Direct the Optoelectronic Scanning Signal Energy Centre*, Optoelectronics-Advanced Materials and Devices, Mexico, 2013.
- [24] Xu, Y.; Yu, H.; Zhong, J.; Lin, T.; Chen, S.: *Real-time seam tracking control technology during welding robot GTAW process based on passive vision sensor*, Elsevier B.V., 2012.
- [25] Garašić, I.: *Nova robotska stanica u laboratoriju za zavarivanje FSB*, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb
- [26] *Mehanizacija i robotizacija*, VarStroj, Slovenija, 2012.
- [27] Petrović, V.: *Moderni robotski sustavi za elektrolučno zavarivanje*, Diplomski rad, Zagreb, 2010.